



Πανεπιστήμιο Θεσσαλίας

Πολυτεχνική Σχολή

Τμήμα Ηλεκτρολόγων Μηχανικών και Μηχανικών Υπολογιστών

**Κυκλωματική υλοποίηση του καναλιού DCI στο πρωτόκολλο LTE με
γλώσσα υψηλού επιπέδου**

Μεταπτυχιακή διατριβή

του

Καρακώστα Μάριου

Επιβλέποντες :

Σταμούλης Γεώργιος
Καθηγητής

Ευμορφόπουλος Νέστωρ
Επίκουρος καθηγητής

Πλέσσας Φώτιος
Επίκουρος καθηγητής

Βόλος, Αύγουστος 2018



ΠΑΝΕΠΙΣΤΗΜΙΟ ΘΕΣΣΑΛΙΑΣ
ΠΟΛΥΤΕΧΝΙΚΗ ΣΧΟΛΗ

Τμήμα Ηλεκτρολόγων Μηχανικών και Μηχανικών Υπολογιστών

Κυκλωματική υλοποίηση του καναλιού DCI στο πρωτόκολλο LTE με γλώσσα υψηλού επιπέδου

Μεταπτυχιακή διατριβή

του

Καρακώστα Μάριου

Επιβλέποντες :

Σταμούλης Γεώργιος
Καθηγητής

Ευμορφόπουλος Νέστωρ
Επίκουρος καθηγητής

Πλέσσας Φώτιος
Επίκουρος καθηγητής

Εγκρίθηκε από την τριμελή εξεταστική επιτροπή στις Αυγούστου 2018

(Υπογραφή)

.....

Σταμούλης Γεώργιος
Καθηγητής

(Υπογραφή)

.....

Ευμορφόπουλος Νέστωρ
Επίκουρος Καθηγητής

(Υπογραφή)

.....

Πλέσσας Φώτιος
Επίκουρος Καθηγητής



ΠΑΝΕΠΙΣΤΗΜΙΟ ΘΕΣΣΑΛΙΑΣ
ΠΟΛΥΤΕΧΝΙΚΗ ΣΧΟΛΗ

Τμήμα Ηλεκτρολόγων Μηχανικών και Μηχανικών Υπολογιστών

Μεταπτυχιακή διατριβή για την απόκτηση του Μεταπτυχιακού Διπλώματος Ειδίκευσης
<< Επιστήμη και Τεχνολογία Ηλεκτρολόγου Μηχανικού και Μηχανικού Υπολογιστών >> στα
πλαίσια του Προγράμματος Μεταπτυχιακών Σπουδών του Τμήματος Ηλεκτρολόγων
Μηχανικών και Μηχανικών Υπολογιστών του Πανεπιστημίου Θεσσαλίας.

(Υπογραφή)

.....

Καρακώστας Μάριος

Στην οικογένειά μου

Ευχαριστίες

Πρωτίστως θα ήθελα να ευχαριστήσω θερμά την οικογένειά μου για την αμέριστη υποστήριξη και την ανεκτίμητη βοήθεια που μου προσέφερε σε όλη τη διάρκεια των σπουδών μου και καθ' όλη την πορεία μέχρι το πέρας της μεταπτυχιακής μου διατριβής.

Θα ήθελα επίσης να ευχαριστήσω ιδιαίτερα τον επιβλέποντα Καθηγητή μου κ. Γεώργιο Σταμούλη για την εμπιστοσύνη που επέδειξε στο πρόσωπό μου, την ευκαιρία που μου έδωσε να εκπονήσω την παρούσα μεταπτυχιακή διατριβή, την άριστη συνεργασία, τις πολύτιμες συμβουλές και τη διαρκή καθοδήγησή του καθώς και για τις γνώσεις που μου μετέδωσε κατά τη διάρκεια των σπουδών μου.

Τέλος θα ήθελα να ευχαριστήσω τον υποψήφιο διδάκτορα κ. Χαράλαμπο Αντωνιάδη για την πολύτιμη βοήθεια και τη συνεχή υποστήριξή του καθ' όλη τη διάρκεια μέχρι την ολοκλήρωση της παρούσας μεταπτυχιακής διατριβής.

Καρακώστας Μάριος
Βόλος, 2018

ΠΕΡΙΕΧΟΜΕΝΑ

Ευχαριστίες	i
Περίληψη.....	vii
Abstract	ix

Κεφάλαιο 1^ο : Εξελικτική πορεία των δικτύων κινητών επικοινωνιών.....

1.1	Εισαγωγή	1
1.2	Ανασκόπηση του Τηλεπικοινωνιακού τοπίου	1
1.3	Οργανισμοί τυποποίησης και πρότυπα δικτύων κινητών επικοινωνιών.....	4
1.4	Ιστορική αναδρομή της κινητής τηλεφωνίας	8
1.4.1	Συμβατική κινητή τηλεφωνία	8
1.4.2	Κυτταρική κινητή τηλεφωνία	10
1.4.2.1	Στόχοι των κυτταρικών δικτύων	10
1.4.2.2	Η πρώτη γενιά κινητών δικτύων (1G).....	11
1.4.2.3	Η δεύτερη γενιά κινητών δικτύων (2G)	11
1.4.2.4	Η δύομιση γενιά κινητών δικτύων (2.5G).....	12
1.4.2.5	Η τρίτη γενιά κινητών δικτύων (3G).....	13
1.4.2.6	Η τρισύμιση γενιά κινητών δικτύων (3.5G)	13
1.4.2.7	Από το <i>UMTS</i> στο <i>LTE</i>	14
1.4.2.8	Από το <i>LTE</i> στο <i>LTE – Advanced</i>	15
1.4.2.9	Η τέταρτη γενιά κινητών δικτύων (4G)	15
1.5	Συμπεράσματα.....	16

Κεφάλαιο 2^ο : Αρχιτεκτονική του Evolved Packet System (EPS)

2.1	Εισαγωγή	17
2.2	Long Term Evolution (LTE).....	17
2.3	Προδιαγραφές και απαιτήσεις του LTE	19
2.4	Αρχιτεκτονική του LTE	23
2.4.1	Αρχιτεκτονική υψηλού επιπέδου	24
2.4.2	Αρχιτεκτονική του εξοπλισμού χρήστη (UE)	26
2.4.3	Αρχιτεκτονική του δικτύου ασύρματης πρόσβασης (E-UTRAN).....	27
2.4.3.1	Πρωτόκολλα επικοινωνίας του E-UTRAN	30
2.4.3.2	Λειτουργίες του E-UTRAN	32
2.4.4	Αρχιτεκτονική του δικτύου κορμού (EPC).....	33
2.4.4.1	Χαρακτηριστικά του EPC	39
2.4.4.2	Περιοχές του EPC.....	40

2.5	Πρωτόκολλα επικοινωνίας στο LTE	41
2.5.1	Πρωτόκολλα μεταφοράς	42
2.5.1.1	Πρωτόκολλα μεταφοράς της διεπαφής αέρα	42
2.5.1.2	Πρωτόκολλα μεταφοράς του σταθερού δικτύου	43
2.5.2	Πρωτόκολλα επιπέδου χρήστη	45
2.5.3	Πρωτόκολλα σηματοδότησης	48
2.5.3.1	Σηματοδότηση Access Stratum (AS)	51
2.5.3.2	Σηματοδότηση Non Access Stratum (NAS)	52
2.6	Διαχείριση φορέων του EPS	54
2.6.1	Δημιουργία φορέων με χρήση του πρωτοκόλλου GTP	57
2.6.2	Φορείς σηματοδότησης (Signaling bearers)	59
2.7	Καταστάσεις του εξοπλισμού χρήστη (UE states)	60
2.7.1	Διαχείριση της κινητικότητας EPS (EMM)	60
2.7.2	Διαχείριση της σύνδεσης EPS (ECM)	61
2.7.3	Διαχείριση των ασύρματων πόρων (RRC)	61
2.8	Συμπεράσματα	63

Κεφάλαιο 3^ο : Αρχιτεκτονική του LTE Physical layer..... **64**

3.1	Εισαγωγή	64
3.2	LTE Air interface	64
3.3	Τεχνική ορθογωνίας πολυπλεξίας με διαίρεση συχνότητας (OFDM)	65
3.3.1	Πλεονεκτήματα της OFDM	71
3.3.2	Κυκλικό πρόθεμα (CP)	72
3.3.3	Κρίσιμοι παράγοντες σχεδίασης στο LTE	74
3.3.4	Τεχνολογία OFDMA	76
3.3.4.1	Τεχνικές καταχώρησης πόρων	79
3.3.4.2	Επαναχρησιμοποίηση συχνοτήτων	79
3.3.4.3	Πλεονεκτήματα της OFDMA	81
3.3.5	Τεχνολογία SC-FDM	81
3.4	Συχνότητες λειτουργίας	84
3.5	Τεχνική duplexing	86
3.5.1	Τεχνική φασματικής διαίρεσης (FDD)	86
3.5.2	Τεχνική χρονικού διαμοιρασμού (TDD)	87
3.6	Εύρος ζώνης καναλιού	88
3.7	Οργάνωση στο πεδίο του χρόνου	91
3.7.1	Δομή πλαισίου	92
3.7.1.1	Δομή πλαισίου τύπου 1	92
3.7.1.2	Δομή πλαισίου τύπου 2	93
3.7.2	Δομή της χρονοθυρίδας	97

3.8	Οργάνωση στο πεδίο της συχνότητας	98
3.8.1	Υλοποίηση υποφορέων.....	99
3.8.2	Κριτήρια επιλογής RB size.....	100
3.9	Αναπαράσταση στο πεδίο του χρόνου και της συχνότητας	101
3.9.1	Resource grid	102
3.9.2	Resource element	104
3.9.3	Resource block	105
3.9.3.1	Physical Resource Blocks (PRBs)	105
3.9.3.2	Virtual Resource Blocks (VRBs)	105
3.9.3.2.1	Virtual Resource Blocks localized type	106
3.9.3.2.2	Virtual Resource Blocks distributed type	106
3.10	Κανάλια μετάδοσης.....	107
3.10.1	Λογικά κανάλια	109
3.10.2	Κανάλια μεταφοράς.....	111
3.10.3	Φυσικά κανάλια.....	113
3.10.4	Channel mapping.....	117
3.10.4.1	Downlink channel mapping	117
3.10.4.2	Uplink channel mapping	119
3.11	Μετάδοση δεδομένων στο PDSCH.....	121
3.11.1	Transport channel processing	122
3.11.2	Physical channel processing	123
3.12	LTE Resource grid	124
3.13	Διαμόρφωση του downlink resource grid	128
3.13.1	CSR resource element mapping	129
3.13.2	PSS / SSS resource element mapping	131
3.13.3	PBCH resource element mapping	133
3.13.4	Control region	135
3.13.4.1	PCFICH resource element mapping	136
3.13.4.2	PHICH resource element mapping.....	137
3.13.4.3	Physical Downlink Control Channel (PDCCH).....	139
3.13.4.3.1	Downlink Control Information (DCI)	139
3.13.4.3.2	Resource allocation.....	142
3.13.4.3.3	PDCCH resource element mapping	149
3.13.4.3.4	PDCCH transmission and reception.....	152
3.13.4.3.5	PDCCH scheduling process	160
3.13.5	PDCSH resource element mapping.....	162
3.13.6	FDD downlink frame structure in LTE	163
3.14	Συμπεράσματα.....	164
	Βιβλιογραφία	165

Περίληψη

Είναι γεγονός ότι διανύουμε την εποχή της επανάστασης των δικτύων κινητών επικοινωνιών. Η εμφάνιση και η εισροή στην αγορά εξελιγμένων τεχνολογικών συσκευών όπως smartphones, smart TVs, tablets, laptops πυροδότησαν μία ραγδαία αύξηση της ποσότητας των δεδομένων. Η δυνατότητα ανάπτυξης εφαρμογών και η εμφάνιση νέων υπηρεσιών όπως κοινωνικά δίκτυα, Web browsing, video on demand, music streaming κατέστησαν επιτακτική την ανάγκη υλοποίησης ενός νέου προτύπου ικανού να ανταποκριθεί στις ολοένα αυξανόμενες και ταχύτατα μεταβαλλόμενες απαιτήσεις του σύγχρονου Τηλεπικοινωνιακού τοπίου ενώ παράλληλα θα είναι απαλλαγμένο από τις παθογένειες των προκατόχων του.

Το Long Term Evolution – LTE, ως πρότυπο τέταρτης γενιάς, δεν καθίσταται απλώς μία εξέλιξη των προϋπαρχόντων 3G συστημάτων αλλά αποτελεί τη βάση πάνω στην οποία θα υλοποιηθούν τα μελλοντικά δίκτυα κινητών επικοινωνιών. Προσφέρει υψηλότερους ρυθμούς μετάδοσης, ευρύτερη γεωγραφική κάλυψη και αδιάλειπτη παροχή επικοινωνιών σε συνδυασμό με την απρόσκοπτη υποστήριξη της κινητικότητας ανεξαρτήτως του τύπου της μεταδιδόμενης πληροφορίας.

Τα νέα πρότυπα LTE και LTE Advanced σηματοδοτούν την απαρχή μίας νέας εποχής στην εξέλιξη της κινητής τεχνολογίας και ενσαρκώνουν το όραμα των Τηλεπικοινωνιών για την παροχή μιας πραγματικά παγκόσμιας τεχνολογίας ευρυζωνικής κινητής πρόσβασης.

Στόχος της παρούσας μεταπτυχιακής διατριβής είναι η μελέτη του LTE προτύπου και η ανάλυση του τρόπου αναπαράστασης της πληροφορίας ελέγχου DCI των καναλιών PDCCH, PCFICH και PHICH του πρωτοκόλλου LTE.

Στο **πρώτο κεφάλαιο** πραγματοποιούμε μία ιστορική αναδρομή στην εξελικτική πορεία των δικτύων κινητών επικοινωνιών. Αναφερόμαστε στους οργανισμούς τυποποίησης που διαμόρφωσαν το τηλεπικοινωνιακό τοπίο, τα πρότυπα των κινητών τεχνολογιών και τις συνθήκες που οδήγησαν στην ανάπτυξη των LTE και LTE-Advanced συστημάτων.

Στο **δεύτερο κεφάλαιο** αναλύουμε την αρχιτεκτονική του Evolved Packet System (EPS). Αναφερόμαστε στα χαρακτηριστικά και τις προδιαγραφές του LTE και στην εξέλιξή του από το UMTS. Περιγράφουμε τη δομή του ασύρματου δικτύου πρόσβασης E-UTRAN και του δικτύου κορμού EPC, τα πρωτόκολλα επικοινωνίας του νέου προτύπου και τον τρόπο μεταφοράς της πληροφορίας.

Στο **τρίτο κεφάλαιο** αναλύουμε την αρχιτεκτονική του φυσικού επιπέδου στο LTE. Αρχικά παραθέτουμε τις προδιαγραφές της διεπαφής του ασύρματου μέσου. Παρουσιάζουμε τις τεχνολογίες OFDMA και SC-FDM, την ιεραρχική δομή των πρωτοκόλλων, τα κανάλια διασύνδεσής τους, τη ροή και την επεξεργασία των δεδομένων. Έπειτα περιγράφουμε τον τρόπο οργάνωσης και αναπαράστασης της πληροφορίας στο χώρο, τον χρόνο και τη συχνότητα και ορίζουμε τις έννοιες του *resource grid*, του *resource block* και του *resource element*. Τέλος, απεικονίζουμε την δομή του LTE πλαισίου για τη μετάδοση των OFDM συμβόλων στην κατερχόμενη ζεύξη.

Abstract

It is a fact that we live in the era of mobile communication networks breakthrough. The emergence and influx of advanced technology devices in the market such as smartphones, smart TVs, tablets, laptops, provoked a rapid increase in the amount of data. The potential application development and the emergence of new services such as social networking, web browsing, video on demand and music streaming have made it necessary to implement a new standard, capable of responding to the ever-increasing and rapidly changing demands of the modern telecommunications landscape while being free of the pathogeneses of its predecessors.

The Long Term Evolution – LTE, as a fourth-generation standard, is not just a progression of pre-existing 3G systems, but it is the basis on which future mobile networks will be implemented. It offers higher transmission rates, wider geographical coverage and uninterrupted provision of communication in combination with seamless support for mobility regardless of the type of information transmitted. The new LTE and LTE Advanced standards mark the beginning of a new era in the evolution of mobile technology and embody the vision of telecommunications to provide a truly global broadband mobile access technology.

The **purpose** of this postgraduate thesis is to study the LTE standard and to analyze how the DCI control information of the PDCCH, PCFICH and PHICH channels of the LTE protocol is represented.

In the **first chapter**, we take a historical look at the evolution of mobile communication networks. We refer to organizations for standardization that have shaped the telecommunications landscape, the mobile technology standards and the conditions that led to the development of LTE and LTE-Advanced systems.

In the **second chapter**, we analyze the architecture of Evolved Packet System (EPS). We refer to the features and specifications of LTE and its evolution from UMTS. We describe the structure of the E-UTRAN radio access network and the EPC core network, the communication protocols of the new standard and how to transfer the information.

In the **third chapter**, we analyze the LTE physical layer architecture. First, we mention the wireless interface specifications. We present the OFDMA and SC-FDM technologies, the hierarchical protocol structure, the interconnection channels, as well as the data flow and processing. We then describe how we organize and represent the information in space, time and frequency and define the concepts of *resource grid*, *resource block* and *resource element*. Finally, we depict the downlink frame structure of the LTE for the transmission of OFDM symbols.

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 1^ο

Εξελικτική πορεία των δικτύων κινητών επικοινωνιών.

1.1 Εισαγωγή

Τα δίκτυα κινητών επικοινωνιών αποτελούν αναπόσπαστο κομμάτι της καθημερινότητάς μας και βασικό πυλώνα στην ανάπτυξη της σύγχρονης κοινωνίας. Διαχειρίζονται τεράστιο αριθμό συνδρομητών, παρέχουν ευρεία ποικιλία υπηρεσιών και καθορίζουν τις εξελίξεις σε παγκόσμιο επίπεδο. Η σημερινή μορφή τους ωστόσο δεν διαμορφώθηκε εξ' αρχής. Χρειάστηκε να μεσολαβήσει μεγάλο χρονικό διάστημα συνοδευόμενο από την διαρκή ανάπτυξη και πρόοδο στην επιστήμη των Τηλεπικοινωνιών προκειμένου να μπορούμε να κάνουμε λόγο σήμερα για ένα από τα μεγαλύτερα τεχνολογικά επιτεύγματα του 21^{ου} αιώνα. Στο κεφάλαιο αυτό πραγματοποιούμε μία ιστορική αναδρομή στο κόσμο των δικτύων κινητών επικοινωνιών παραθέτοντας τους παράγοντες και τις συνθήκες που οδήγησαν στην εξέλιξή τους.

1.2 Ανασκόπηση του Τηλεπικοινωνιακού τοπίου.

Η δυνατότητα της ελεύθερης κίνησης του συνδρομητή και η αποδέσμευσή του από σταθερά σημεία αποτελούν τις θεμελιώδεις συνιστώσες που καθιστούν τις κινητές επικοινωνίες ιδιαίτερα ελκυστικές και κινητήριο δύναμη για την ανάπτυξη και εξέλιξή τους. Το έντονο ενδιαφέρον και η μελέτη τους ξεκίνησε στα τέλη του 1800 με την ανακάλυψη της ασύρματης διάδοσης. Αμέσως έγινε αντιληπτή η σπουδαιότητα του επιτεύγματος αυτού καθώς και τα τεράστια οφέλη που θα αποκόμιζε η ανθρωπότητα από την εφαρμογή του. Ωστόσο η ανάπτυξη του τομέα των Τηλεπικοινωνιών αποτελεί δύσκολη και απαιτητική πρόκληση και ως εκ τούτου πραγματοποιήθηκε σταδιακά με το πέρασμα των χρόνων συνοδευόμενη πάντα από την εκάστοτε εξέλιξη και πορεία της τεχνολογίας.

Η πρόκληση των κινητών δικτύων σχετίζεται με το ασύρματο μέσο διάδοσης το οποίο καθίσταται ιδιαίτερα εχθρικό ως προς τη μετάδοση των τηλεπικοινωνιακών σημάτων. Όπως γνωρίζουμε από τις ασύρματες επικοινωνίες τα ηλεκτρομαγνητικά κύματα υπόκεινται σε διάφορους μηχανισμούς διάδοσης και αλληλεπιδρούν με το περιβάλλον. Απόρροια αυτού είναι τα κυματικά φαινόμενα της ανάκλασης, της διάθλασης, της περίθλασης, της σκέδασης και της πολυόδευσης τα οποία εισάγουν επιπλέον απώλειες στην ισχύ του σήματος λήψης πέραν των απωλειών λόγω απόστασης από τον πομπό και συχνότητας λειτουργίας.

Αναφορικά λοιπόν με τα παραπάνω ο πρώτος στόχος που τέθηκε από τον τομέα των Επικοινωνιών αφορούσε την ασύρματη σύνδεση ανάμεσα στον πομπό και το δέκτη και την επιτυχημένη μετάδοση της φωνής. Η επιτυχία αυτή επήλθε μέσα από τα **πρώτα συστήματα συμβατικής κινητής τηλεφωνίας** τα οποία ωστόσο λόγω των πολλαπλών μειονεκτημάτων σχετικά με τον τρόπο λειτουργίας τους και τις τεχνικές αναλογικής πρόσβασης εγκαταλείφθηκαν γρήγορα παραχωρώντας τη θέση τους στα συστήματα πρώτης γενιάς (1G).

Τα **συστήματα πρώτης γενιάς** αποτέλεσαν τα πρώτα κινητά δίκτυα μεγάλης κλίμακας προσανατολισμένα για εμπορική χρήση. Ωστόσο παρείχαν τη δυνατότητα ηλεκτρομαγνητικής κάλυψης μίας μόνο συγκεκριμένης περιοχής ενώ η ασυμβατότητα των υποστηριζόμενων τεχνολογιών και των πρωτοκόλλων τους μοιραία οδήγησε στην γεωγραφικό αποκλεισμό τους και σε αδυναμία περαιτέρω διασύνδεσής τους.

Το 1990 εμφανίζονται τα **κινητά δίκτυα δεύτερης γενιάς**. Η χρονολογία αυτή αποτελεί ορόσημο ως προς την μετέπειτα εξέλιξη των κινητών επικοινωνιών. Τα 2G συστήματα και κυρίως το GSM άσκησαν τεράστια επιρροή και διαδραμάτισαν καθοριστικό ρόλο στην διαμόρφωση της μορφής των δικτύων όπως την αντιλαμβανόμαστε σήμερα. Τα συστήματα αυτά εισάγουν την ψηφιακή μετάδοση, την δυνατότητα της παγκόσμιας περιαγωγής και μέσω των εξελιγμένων τεχνολογιών πρόσβασης (συγκριτικά με τα 1G) και της υποδομής τους καθίστανται η βάση σχεδιασμού και ανάπτυξης των επόμενων γενιών.

Παράλληλα η χρονική περίοδος εμφάνισης και λειτουργίας τους συμπίπτει με τα αρχικά στάδια της εξέλιξης του Διαδικτύου. Έτσι αρχίζει αμέσως να διαφαίνεται η προοπτική διασύνδεσης με αυτό και η μετάδοση δεδομένων παράλληλα με τις φωνητικές κλήσεις. Η δυνατότητα της μεταφοράς δεδομένων υποστηρίχθηκε από τα **συστήματα 2.5G**.

Με την επίτευξη της ασύρματης πρόσβασης στο Διαδίκτυο και τη μετάδοση φωνής και δεδομένων το ενδιαφέρον της επιστημονικής κοινότητας στράφηκε προς την εξέλιξη και εξεύρεση νέων τεχνολογιών πρόσβασης για την εξασφάλιση μεγαλύτερων ρυθμών μετάδοσης και την παροχή υπηρεσιών υψηλής ποιότητας εξυπηρέτησης. Η έλευση των **δικτύων τρίτης γενιάς** (3G) αποτέλεσε το επόμενο μεγάλο άλμα στην τηλεπικοινωνιακή εξέλιξη. Τα 3G συστήματα μέσω της εξελιγμένης υποδομής τους καταφέρνουν να ενσωματώσουν δυνατότητες οι οποίες δεν είχαν προσφερθεί από τους προκατόχους τους. Ωστόσο οι υψηλές προσδοκίες δεν επαληθεύτηκαν στην πράξη δημιουργώντας έτσι την ανάγκη για βελτίωσή τους μέσω των συστημάτων 3.5G.

Στα **δίκτυα 3.5G** σημειώθηκαν βελτιστοποιήσεις ως προς τη διεπαφή αέρα για την υποστήριξη ρυθμών μετάδοσης αντάξιων των προδιαγραφών που έπρεπε να επιτυγχάνουν τα 3G συστήματα. Ωστόσο τα δεδομένα έμελλε να αλλάξουν εκ νέου. Μέχρι και το 2007 οι δύο ροές πληροφορίας, φωνή και δεδομένα, συνυπήρχαν στο δίκτυο με το ποσοστό των φωνητικών κλήσεων να υπερτερεί. Στις χρονιές που ακολουθούν ωστόσο παρατηρείται μία εκθετική αύξηση στην κατανάλωση δεδομένων εν αντιθέσει με τις φωνητικές κλήσεις οι οποίες τείνουν να σταθεροποιηθούν σαν ποσοστό επί της συνολικής τηλεπικοινωνιακής κίνησης. Η αυξητική αυτή τάση εξακολουθεί να επικρατεί μέχρι και τις μέρες μας.

Η έκρηξη αυτή στη διακίνηση των δεδομένων πηγάζει από την εμφάνιση νέων τεχνολογικών συσκευών όπως smartphones, smart TVs, tablets, laptops κ.α.. Οι συσκευές αυτές αποκτούν πλέον χαρακτηριστικά, δυνατότητες και λειτουργίες αντάξιες των προσωπικών υπολογιστών και παρέχουν υπηρεσίες οι οποίες μέχρι πρότινος ήταν συνυφασμένες μόνο με τα ενσύρματα δίκτυα (π.χ. ADSL...). Η τεχνολογική αυτή ευημερία αντικατοπτρίζεται στην τηλεπικοινωνιακή κίνηση των δικτύων κινητών επικοινωνιών. Το τηλεπικοινωνιακό προφίλ των συνδρομητών καθίσταται σύνθετο και πολυδιάστατο καθώς απαρτίζεται από διαφορετικές ροές πληροφορίας, με την κάθε μία να απαιτεί αυστηρώς καθορισμένα κριτήρια μετάδοσης.

Η ραγδαία αύξηση των δεδομένων και η προοπτική ενσωμάτωσης νέων πολυμεσικών υπηρεσιών εξωθούν στα όρια των δυνατοτήτων τους τα συστήματα 2G και 3G δημιουργώντας μία κατάσταση υπερφόρτισης και κορεσμού της χωρητικότητας τους. Προκύπτει επομένως η ανάγκη αποσυμφόρησης των δικτύων, αύξησης της χωρητικότητας και αποδοτικότερης διαχείρισης των περιορισμένων διαθέσιμων πόρων σε συνδυασμό με την ταυτόχρονη μείωση της πολυπλοκότητας και του κόστους συντήρησης και χρήσης της υποδομής τους. Οι συνθήκες αυτές προετοίμασαν το έδαφος για την ανάπτυξη των δικτύων τέταρτης γενιάς (4G).

Τα **4G δίκτυα** ενσαρκώνουν το όραμα των Τηλεπικοινωνιών που δεν είναι άλλο από την ενοποίηση όλων των υπάρχοντων τηλεπικοινωνιακών δικτύων (ασύρματα, ενσύρματα, δορυφορικά, 2G, 3G...) σε ένα ενιαίο δίκτυο κορμού. Θα πληρούν όλες τις προδιαγραφές όπως εκπληκτικά γρήγορους ρυθμούς μετάδοσης, βέλτιστη διαχείριση των πόρων, υψηλή φασματική απόδοση, ασφάλεια των δεδομένων, ενεργειακή εξοικονόμηση, επαρκής χωρητικότητα, πλήθος υπηρεσιών υψηλής ποιότητας εξυπηρέτησης, χαμηλό και προσιτό κόστος υλοποίησης, λειτουργίας, συντήρησης και χρήσης. Εν κατακλείδι τα δίκτυα τέταρτης γενιάς θα αλλάξουν ριζικά τον ορισμό και τη μορφή του κινητού δικτύου επικοινωνιών όπως τον ξέραμε μέχρι πρότινος.

1.3 Οργανισμοί τυποποίησης και πρότυπα δικτύων κινητών επικοινωνιών.

Μόλις την τελευταία 25ετία σημειώθηκε τεράστια εξέλιξη των δικτύων κινητών επικοινωνιών η οποία αντικατοπτρίζεται σε μία σειρά από πρότυπα που καθορίζουν τις διαφορετικές γενιές των δικτύων αυτών. Με τον όρο *γενιά* αναφερόμαστε στις προδιαγραφές που ορίζονται ρητώς από κάποιο πρότυπο, περιγράφουν λεπτομερώς την αρχιτεκτονική ενός δικτύου, τις τεχνικές παραμέτρους, τις τεχνολογίες ασύρματης πρόσβασης, τα πρωτόκολλα επικοινωνίας, τις υποστηριζόμενες υπηρεσίες και τις δυνατότητες του τεχνολογικού εξοπλισμού. Η μελέτη και ο σχεδιασμός ενός τέτοιου προτύπου αποτελεί αντικείμενο έρευνας και ευθύνη ενός οργανισμού τυποποίησης.

Ιστορικά η πρόοδος της κινητής τηλεφωνίας έχει συντελεστεί μέσα από κοινοπραξίες και συνεργασίες των παρόχων δικτύων και των φορέων εκμετάλλευσης που εδράζονται στην Ευρώπη, τη Βόρεια Αμερική και σε άλλες περιοχές του κόσμου. Ωστόσο τρεις είναι οι κυρίαρχοι οργανισμοί τυποποίησης οι οποίοι μέσα από ανεξάρτητες εξελικτικές διαδρομές διαμόρφωσαν το σύγχρονο τηλεπικοινωνιακό τοπίο με τη μορφή που το αντιλαμβανόμαστε σήμερα. Πρόκειται για τους οργανισμούς 3rd Generation Partnership Project (**3GPP**), 3rd Generation Partnership Project2 (**3GPP2**) και Institute of Electrical and Electronics Engineers (**IEEE**) με τον 3GPP να έχει εξελιχθεί σε παγκόσμιο κυρίαρχο στην παραγωγή προτύπων για τα συστήματα 3G και 4G.

Τα δίκτυα δεύτερης γενιάς (**2G**) τίθενται σε λειτουργία το 1990. Από αυτά ξεχωρίζουν το ευρωπαϊκό **GSM** και το αμερικάνικο **IS-95**. Το GSM αποτελεί ένα πανευρωπαϊκό πρότυπο του οργανισμού European Telecommunications Standards Institute (**ETSI**) και αποτελεί μακράν το πιο επιτυχημένο 2G δίκτυο καταλήγοντας να υιοθετηθεί σε παγκόσμιο επίπεδο αν και ξεκίνησε ως ευρωπαϊκό. Το GSM κάνει χρήση μεταγωγή κυκλώματος για τη διεκπεραίωση φωνητικών κλήσεων με ρυθμό μετάδοσης **9.6kbps** ενώ χρησιμοποιεί την τεχνική πολλαπλής πρόσβασης με διαίρεση χρόνου (**TDMA**).

Οι βελτιώσεις που πραγματοποιήθηκαν στο GSM αναφέρονται ως δίκτυα **2.5G** και είναι γνωστά ως **GPRS** και **EDGE**. Τα πρότυπα αυτά διατήρησαν την μεταγωγή κυκλώματος για την εξυπηρέτηση υπηρεσιών φωνής, ωστόσο για πρώτη φορά παρείχαν τη δυνατότητα ασύρματης πρόσβασης στο Διαδίκτυο και τη μεταφορά δεδομένων με χρήση μεταγωγής πακέτου. Το GPRS με τεχνικές ορθότερης διαχείρισης των πόρων επιτύγχανε ρυθμό **171.2kbps** ενώ το EDGE χρησιμοποιώντας διαμόρφωση 8-PSK ρυθμό **384kbps**.

Στον αντίποδα το **IS-95** αποτέλεσε ένα αμερικάνικο 2G πρότυπο το οποίο χρησιμοποίησε την τεχνική πρόσβασης με διαίρεση κώδικα (**CDMA**) με ρυθμό **14.4kbps**. Η βελτίωση του IS-95 ήταν το **IS-95B** που υποστήριζε μεταγωγή πακέτου και μετάδοση στα **115.2kbps**.

Στα τέλη του 1990 η Διεθνής Ένωση Τηλεπικοινωνιών (International Telecommunication Union - ITU) ορίζει τις προδιαγραφές International Mobile Telecommunications – 2000 (**IMT-2000**) με τις οποίες πρέπει να συμμορφώνονται τα πρότυπα των δικτύων κινητών επικοινωνιών ώστε να αναγνωρίζονται ως δίκτυα τρίτης γενιάς (3G). Έκτοτε οι οργανισμοί 3GPP και 3GPP2 ακολούθησαν ξεχωριστές διαδρομές στον αγώνα της ανάπτυξης προτύπων συμβατών με τις απαιτήσεις του IMT-2000.

Ο **3GPP2** βασίστηκε στην τεχνολογία CDMA των συστημάτων IS-95 και IS-95B για την υλοποίηση δικτύων 3G. Έτσι από το 1997 έως το 2003 ανέπτυξε μία οικογένεια προτύπων η οποία περιλαμβάνει τα **cdma2000**, **cdma2000 1xRTT** (1xRadio Transmission Technology), **cdma2000 1xEV-DO** (Evolved Voice Data Only), **cdma2000 1xEV-DV** (Evolved Data and Voice) και **HRPD** (High Rate Packet Data). Το cdma2000 είναι αμερικανικό standard και εξελίχθηκε με βάση το IS-95. Ωστόσο η πραγματική **3G** τεχνολογία του 3GPP2 ήταν το σύστημα cdma2000 1xRTT με data rate που έφθανε τα **307kbps**. Τα πρότυπα HRPD και 1xEV-DO αποτελούν βελτιώσεις του 1xRTT και αναφέρονται ως **δίκτυα 3.5G**. Τα πρότυπα του 3GPP2 επιτυγχάνουν ρυθμούς μετάδοσης από **2.4** έως **3.1 Mbps** ενώ εισήγαγαν για πρώτη φορά καινοτόμα χαρακτηριστικά όπως η προσαρμοστική διαμόρφωση και κωδικοποίηση, η τεχνική HARQ, η κωδικοποίηση Turbo.

Από την άλλη ο οργανισμός **3GPP** ακολούθησε διαφορετική πορεία προς τη 3G εποχή στηριζόμενος στην τεχνολογία TDMA και το GSM. Το 2001 παρουσιάζει το 3G πρότυπο ευρείας ζώνης CDMA (**WCDMA**) γνωστό ως Universal Mobile Telecommunications System (**UMTS**) οι προδιαγραφές του οποίου αποτελούν την **έκδοση 4** (Release 4). Όμως το UMTS δεν τήρησε τις υπόσχεση για μετάδοση δεδομένων υψηλής ταχύτητας με το ρυθμό μετάδοσης να οριοθετείται στα **1.92Mbps**.

Ο 3GPP προωθεί τη βελτίωση του UMTS με την ενσωμάτωση νέων χαρακτηριστικών αποσκοπώντας στις υψηλές ταχύτητες τόσο στην κατερχόμενη όσο και στην ανερχόμενη ζεύξη. Οι αναβαθμίσεις αυτές αναφέρονται ως **HSDPA** και **HSUPA** με τις προδιαγραφές τους να περιγράφονται στις **εκδόσεις 5** και **6** αντίστοιχα. Τα πρότυπα HSDPA και HSUPA είναι γνωστά ως τεχνολογία **HSPA** και επιτυγχάνουν data rates **14.4Mbps** (στο Downlink) και **5.8Mbps** (στο Uplink). Η περαιτέρω αναβάθμιση του HSPA ονομάζεται **HSPA+**. Ο 3GPP με την έκδοση του HSPA+ εισήγαγε για πρώτη φορά την τεχνολογία 2x2 MIMO, τη διαμόρφωση 64QAM, τη δυνατότητα προσαρμοστικής διαμόρφωσης και κωδικοποίησης, την

τεχνική HARQ, την κωδικοποίηση Turbo κ.α. επιτυγχάνοντας μέγιστο ρυθμό **84Mbps**.

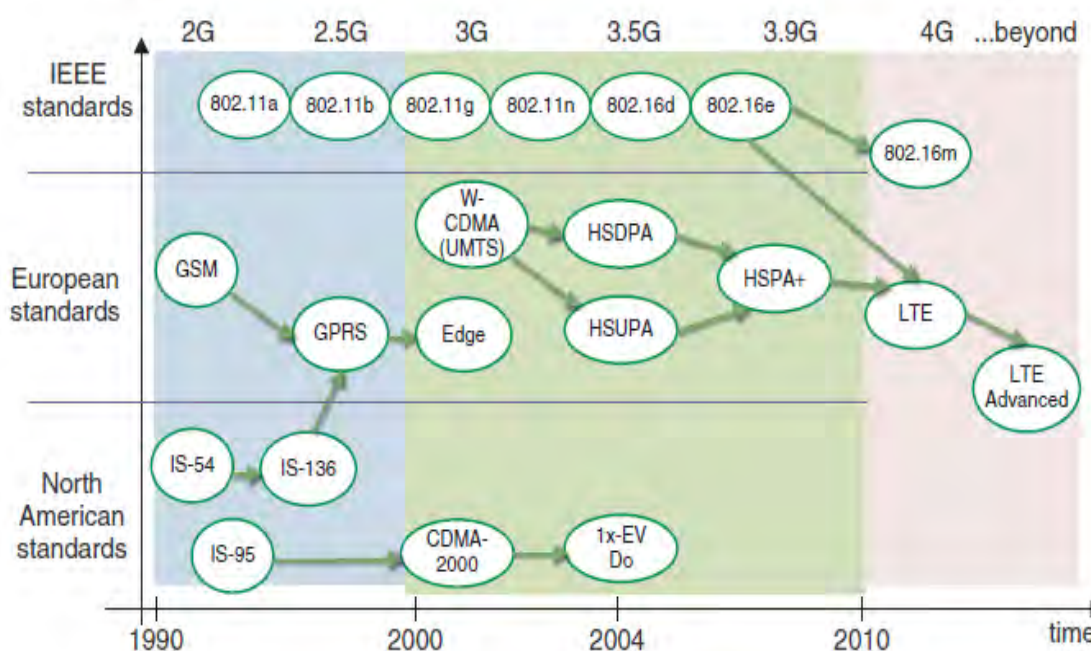
Καθώς οι 3GPP και 3GPP2 προχωρούσαν με την ανάπτυξη και τη βελτίωση των 3G προτύπων τους μέσα από τις εκδόσεις των HSPA και HRPD ένας άλλος επαγγελματικός οργανισμός, και συγκεκριμένα η επιτροπή **IEEE 802 LAN/MAN** του Ινστιτούτου Ηλεκτρολόγων και Ηλεκτρονικών Μηχανικών (Institute of Electrical and Electronic Engineers - IEEE) εργάζεται πάνω στην υλοποίηση πρωτοκόλλων ασύρματης ευρυζωνικής σύνδεσης. Τα πρότυπα αυτά ανήκουν στην οικογένεια **802.16**, ονομάζονται **WiMAX**, είναι προσανατολισμένα αποκλειστικά στην μετάδοση πακέτων και χρησιμοποιούν την τεχνολογία πρόσβασης **OFDM** επιτυγχάνοντας υψηλούς ρυθμούς μετάδοσης, αποδοτικότερη διαχείριση πόρων και υψηλή φασματική απόδοση. Η πρώτη έκδοση του WiMAX, η **802.16-2004** ονομάστηκε **fixed WiMAX** και αφορούσε αποκλειστικά ενσύρματη πρόσβαση. Τα επόμενα πρότυπα όμως εξελίχθηκαν με γνώμονα την υποστήριξη της κινητικότητας του χρήστη και τη διαλειτουργικότητα με άλλα δίκτυα. Έτσι προέκυψε η έκδοση **802.16e** με την ονομασία **mobile WiMAX**. Το 2006 η IEEE παρουσίασε το **802.16m** ή αλλιώς **WiMAX 2.0**, η δημιουργία του οποίου βασίστηκε στο πρωτόκολλο IP και υποστήριζε την ασύρματη πλέον ευρυζωνική σύνδεση για τη μετάδοση πακέτων.

Η αρχιτεκτονική του 802.16e και η τεχνολογία OFDM ώθησε τους οργανισμούς 3GPP και 3GPP2 στην ανάπτυξη ανταγωνιστικών ως προς το mobile WiMAX συστημάτων. Η 3GPP στράφηκε στα UMTS και HSPA. Επιτυγχάνοντας καθοριστικές αλλαγές στο ραδιοδίκτυο αλλά και στον κορμό του δικτύου της υποδομής του UMTS υλοποιεί το πρότυπο Long Term Evolution (**LTE**). Η πρώτη έκδοση του LTE πραγματοποιήθηκε το 2008 και αναφέρεται ως **Release 8**. Ορισμένες μικρές τροποποιήσεις ενσωματώθηκαν στην δεύτερη έκδοση **Release 9**. Η περαιτέρω εξέλιξη του LTE ονομάζεται **LTE-Advanced**. Το LTE-Advanced περιλαμβάνει νέα χαρακτηριστικά που αναγράφονται ρητώς στην **έκδοση 10**. Παράλληλα η 3GPP2 βασιζόμενη στο cdma2000 ανέπτυξε το πρότυπο Ultra Mobile Broadband (**UMB**).

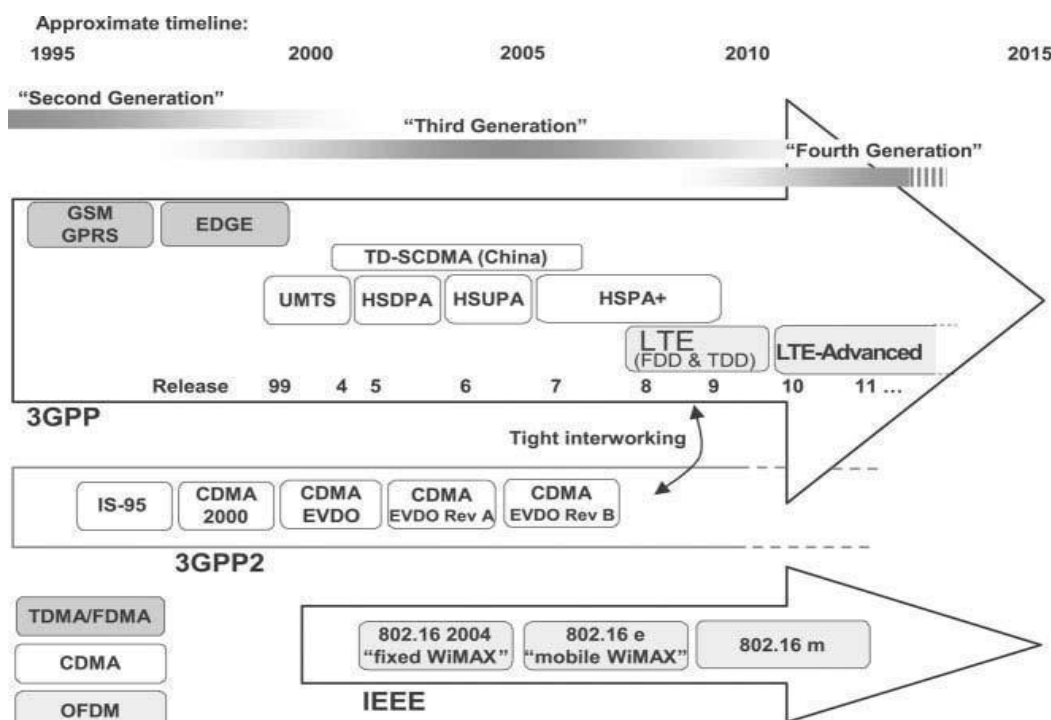
Στον πίνακα που ακολουθεί συνοψίζονται τα όλα τα προαναφερθέντα δίκτυα κινητών επικοινωνιών συνοδευόμενα από τους ρυθμούς μετάδοσης του καθενός ενώ στα επόμενα σχήματα αποτυπώνεται η εξελικτική πορεία τους μέσα από τα τεχνολογικές διαδρομές που χάραξαν οι οργανισμοί 3GPP, 3GPP2 και IEEE.

Technology	Theoretical peak data rate (at low mobility)
GSM	9.6 kbps
IS-95	14.4 kbps
GPRS	171.2 kbps
EDGE	473 kbps
CDMA-2000 (1xRTT)	307 kbps
WCDMA (UMTS)	1.92 Mbps
HSDPA (Rel 5)	14 Mbps
CDMA-2000 (1x-EV-DO)	3.1 Mbps
HSPA+ (Rel 6)	84 Mbps
WiMAX (802.16e)	26 Mbps
LTE (Rel 8)	300 Mbps
WiMAX (802.16m)	303 Mbps
LTE-Advanced (Rel 10)	1 Gbps

Πίνακας 1.1: Μέγιστοι ρυθμοί μετάδοσης των κινητών προτύπων.



Σχήμα 1.1: Εξέλιξη των δικτύων κινητών επικοινωνιών.



Σχήμα 1.2: Οργανισμοί τυποποίησης, πρότυπα και τεχνολογίες πρόσβασης.

1.4 Ιστορική αναδρομή της κινητής τηλεφωνίας

1.4.1 Συμβατική κινητή τηλεφωνία

Τα πρώτα συστήματα κινητής τηλεφωνίας δεν είχαν τη μορφή που γνωρίζουμε σήμερα. Μέχρι το 1970 η κινητή τηλεφωνία ανήκε στο χώρο της αναλογικής συμβατικής ασύρματης τηλεφωνίας. Τα χαρακτηριστικά των πρώτων κινητών δικτύων ήταν τα εξής:

1. Μεγάλη εκπεμπόμενη ισχύς του σταθμού βάσης.

Τα παραδοσιακά συστήματα κινητής τηλεφωνίας χρησιμοποιούσαν έναν κεντρικό σταθμό βάσης για την κάλυψη μίας μεγάλης γεωγραφικής περιοχής. Ο σταθμός βάσης περιείχε τον απαιτούμενο αριθμό πομποδεκτών και χρησιμοποιούσε μία ισχυρή κεραία η οποία εξέπεμπε τα σήματα με την μέγιστη ισχύ (της τάξης των 200-300 Watt). Αν και η ηλεκτρομαγνητική κάλυψη ήταν πολύ καλή τα επίπεδα της εκπεμπόμενης ισχύος έθεταν σε κίνδυνο την υγεία των κατοίκων και δημιουργούσαν ισχυρή παρεμβολή.

2. Μικρή χωρητικότητα

Στην συμβατική τηλεφωνία λόγω περιορισμένου εύρους ζώνης λειτουργίας ο αριθμός των διαθέσιμων καναλιών ήταν μικρός. Όταν κάποιος χρήστης επιθυμούσε να αποκτήσει πρόσβαση στο δίκτυο δέσμευε ένα κανάλι για αποκλειστική χρήση καθ' όλη τη διάρκεια της εξυπηρέτησής του και σε όλη τη γεωγραφική περιοχή του δικτύου. Ο αναποτελεσματικός αυτός τρόπος διαχείρισης των περιορισμένων πόρων σε συνδυασμό με τις τεχνικές πρόσβασης και την αύξηση των συνδρομητών είχαν ως αποτέλεσμα την ύπαρξη πολλών αποτυχημένων κλήσεων (υψηλό GoS) και οδηγούσαν γρήγορα το σύστημα σε κορεσμό.

3. Χαμηλή ποιότητα επικοινωνίας

Η τεχνική διαμόρφωσης που χρησιμοποιούνταν ήταν στενής ζώνης. Η χρήση ραδιοδιαύλων με στενό εύρος ζώνης αυξάνει μεν τον αριθμό τους όμως λόγω έλλειψης επεξεργασίας της φωνής καθιστά τα συστήματα αυτά ευάλωτα στην παρεμβολή γειτονικού καναλιού. Έτσι προκειμένου να εξασφαλιστεί μία ικανοποιητική ποιότητα επικοινωνίας έπρεπε να χρησιμοποιείται μόνο ένα υποσύνολο των διαθέσιμων ραδιοδιαύλων για ταυτόχρονη εξυπηρέτηση.

4. Ευαισθησία σε παρεμβολές και στις συνθήκες μετάδοσης.

Ο αριθμός των σταθμών βάσης των παραδοσιακών δικτύων ήταν περιορισμένος. Κάθε ένας από αυτούς παρείχε κάλυψη σε μία πολύ μεγάλη περιοχή. Αυτό συνεπάγεται σημαντικές απώλειες διαδρομής στο εκπεμπόμενο σήμα, σοβαρά προβλήματα λόγω των φαινομένων διάδοσης (ανάκλαση, διάθλαση, περίθλαση, σκέδαση, πολυόδευση), αυξημένα επίπεδα παρεμβολών και επομένως ανεπαρκή κάλυψη όσο πλησιάζουμε προς τα όρια της περιοχής εξυπηρέτησης του σταθμού βάσης.

5. Υψηλό κόστος συνδρομητή.

6. Ασυμβατότητα με άλλα δίκτυα και αδυναμία περιαγωγής.

Τα συμβατικά κινητά δίκτυα δεν ήταν συμβατά ως προς τις διαφορετικές τεχνολογίες που το κάθε ένα χρησιμοποιούσε. Έτσι ο συνδρομητής ενός δικτύου είχε την δυνατότητα να συνομιλεί με άλλους συνδρομητές που ανήκαν στο ίδιο δίκτυο αλλά αδυναμία πραγματοποίησης κλήσεων προς άλλα δίκτυα. Παράλληλα δεν υπήρχε η δυνατότητα της περιαγωγής σε άλλο δίκτυο με συνέπεια ο συνδρομητής να είναι εγκλωβισμένος σε μία μόνο γεωγραφική περιοχή όπου του παρείχε κάλυψη το δίκτυό του.

1.4.2 Κυτταρική κινητή τηλεφωνία

Τα μειονεκτήματα των συμβατικών δικτύων κινητής τηλεφωνίας έγιναν γρήγορα αντιληπτά. Για να εξελιχθούν και να ανταπεξέλθουν στις ανάγκες της χωρητικότητας και να παρέχουν υψηλή ποιότητα μετάδοσης έπρεπε να αλλάξουν την αρχιτεκτονική τους, τις αρχές λειτουργίας τους και τις τεχνικές πρόσβασης.

Η κυτταρική προσέγγιση ήταν η ιδέα που άλλαξε ριζικά την δομή και τον τρόπο λειτουργίας των κινητών δικτύων. Τα κυτταρικά δίκτυα κινητών επικοινωνιών εξελίχθηκαν με την πάροδο του χρόνου και διακρίνονται σε γενιές, με την κάθε γενιά να επιδεικνύει τα δικά της τεχνολογικά χαρακτηριστικά.

1.4.2.1 Στόχοι των κυτταρικών δικτύων

Πλέον τα κυτταρικά δίκτυα θα πρέπει να διασφαλίζουν τις παρακάτω προδιαγραφές:

1. Υψηλή χωρητικότητα.

Αφορά τον τρόπο σχεδίασης και την μετέπειτα ικανότητα του δικτύου να εξυπηρετεί έναν μεγάλο αριθμό συνδρομητών και να διαχειρίζεται με αξιοπιστία την παραγόμενη τηλεπικοινωνιακή κίνηση.

2. Μεγάλη απόδοση του διαθέσιμου ραδιοφάσματος.

Αφορά στον τρόπο διαχείρισης των πόρων του δικτύου με σκοπό την επίτευξη της βέλτιστης απόδοσης του ραδιοφάσματος.

3. Ποιότητα υπηρεσιών.

Αφορά την ικανότητα του δικτύου να εξασφαλίζει στους συνδρομητές με βάση τη σχεδίαση και την μετέπειτα υλοποίησή του αξιόπιστες υπηρεσίες αντίστοιχες των ενσύρματων δικτύων, υψηλό SNR, χαμηλό BER.

4. Προσαρμογή στις μεταβολές της τηλεπικοινωνιακής κίνησης.

Η τηλεπικοινωνιακή κίνηση χαρακτηρίζεται από ανομοιομορφία. Η κατανομή της μεταβάλλεται ως προς το χώρο ακολουθώντας την πληθυσμιακή κατανομή και ως προς το χρόνο (μεταβολή καθημερινή αλλά και εποχιακή). Το δίκτυο επομένως θα πρέπει να χαρακτηρίζεται από ευελιξία και να προσαρμόζεται ανάλογα με την εμφανιζόμενη τηλεπικοινωνιακή κίνηση.

5. Συμβατότητα.

Τα κυτταρικά συστήματα κινητών επικοινωνιών θα πρέπει να είναι συμβατά μεταξύ τους σε Εθνικό αλλά και Διεθνές επίπεδο όσον αφορά τον εξοπλισμό (Hardware) που χρησιμοποιούν και τα πρωτόκολλα (Software) λειτουργίας τους.

6. Ασφάλεια δεδομένων

Η πολυπλοκότητα των σύγχρονων επικοινωνιακών δικτύων, η ύπαρξη πολλαπλών διεπαφών για την μετάδοση των πληροφοριών και η διασύνδεση και συνλειτουργία διαφορετικών τύπων συστημάτων (2G, 3G, 4G, PDNs) εγείρουν σοβαρά ζητήματα ασφάλειας και προστασίας των ευαίσθητων προσωπικών δεδομένων των συνδρομητών και των μεταδιδόμενων πληροφοριών.

7. Προσιτό κόστος.

Ο σχεδιασμός, η υλοποίηση και η λειτουργία του δικτύου θα πρέπει να αποσκοπούν στην παροχή αξιόπιστων υπηρεσιών και στην επίτευξη υψηλού βαθμού εξυπηρέτησης (Quality of Service-QoS) και παράλληλα να διασφαλίζεται η ελαχιστοποίηση του οικονομικού κόστους που επιβαρύνει τον πάροχο κινητών υπηρεσιών και τους συνδρομητές του.

1.4.2.2 Η πρώτη γενιά κινητών δικτύων (1G)

Από το 1970 μέχρι το 1990 τίθενται σε λειτουργία τα κινητά δίκτυα πρώτης γενιάς. Τα συστήματα αυτά υλοποιήθηκαν με βάση την κυτταρική δομή και χρησιμοποιούσαν τεχνικές αναλογικής μετάδοσης (FDMA). Η κίνηση που διεκπεραίωναν ήταν αποκλειστικά φωνή και μπορούσαν να επιτύχουν ρυθμούς μετάδοσης μέχρι **2.4Kbps**. Κάλυπταν μία μόνο γεωγραφική περιοχή, διέθεταν μικρή χωρητικότητα και χαρακτηρίζονταν από χαμηλή απόδοση λόγω των τεχνικών κατανομής και διαχείρισης του φάσματος. Υπήρχε ασυμβατότητα μεταξύ των διαφόρων δικτύων λόγω της χρησιμοποίησης διαφορετικών συχνοτήτων και πρωτοκόλλων με αποτέλεσμα οι υπηρεσίες του κάθε δικτύου να περιορίζονται μόνο εντός της περιοχής κάλυψής του. Μερικά από τα δίκτυα πρώτης γενιάς είναι τα παρακάτω:

- 1. Total Access Communication System (TACS), Μ.Βρετανία 1985**
- 2. Advance Mobile Phone Service (AMPS) USA 1983**
- 3. Nordic Mobile Telephone (NMT), Σκανδιναβία 1981**
- 4. Cordless Telephone-first generation (CT1)**
- 5. Cordless Telephone-second generation (CT2)**

1.4.2.3 Η δεύτερη γενιά κινητών δικτύων (2G)

Από το 1990 μέχρι το 2000 εμφανίστηκαν τα κινητά δίκτυα δεύτερης γενιάς. Τα δίκτυα αυτά ήταν οργανωμένα πλέον κυτταρικά συστήματα κάνοντας χρήση ιεραρχικής δομής κελιών όπως τα μακροκύτταρα, τα μικροκύτταρα και τα πικοκύτταρα. Η κύρια διαφορά τους από τα δίκτυα πρώτης γενιάς είναι η ψηφιακή μετάδοση των δεδομένων η οποία εκτός από τη φωνή περιλαμβάνει και δεδομένα. Οι τεχνικές πρόσβασης που χρησιμοποιούνται είναι με διαίρεση χρόνου (TDMA) ή με

διαίρεση κώδικα (CDMA) και επιτυγχάνονται ρυθμοί μετάδοσης μέχρι **9.6Kbps**. Χαρακτηρίζονται από πολυεπίπεδη δομή, υψηλή χωρητικότητα, δυναμική διαχείριση του ραδιοφάσματος, επαναχρησιμοποίηση συχνοτήτων και βελτιωμένη ποιότητα επικοινωνίας. Τα συστήματα δεύτερης γενιάς είναι τα παρακάτω:

1. Global System for Mobile (**GSM**): Πανευρωπαϊκό standard. Οι συχνότητες λειτουργίας του είναι τα 900MHz, 1800MHz. Μακράν το πιο επιτυχημένο και διαδεδομένο δίκτυο 2G αφού αν και ξεκίνησε ως πανευρωπαϊκό τελικώς υιοθετήθηκε παγκοσμίως. Βασίζεται σε τεχνολογία πρόσβασης TDMA.
2. Pacific Digital Cellular (**PDC**): Ιαπωνικό standard με τεχνική πρόσβασης TDMA.
3. Digital-AMPS (**D-AMPS**): Αμερική
4. **IS-95**: Αμερικανικό standard βασισμένο στην τεχνολογία Code Division Multiple Access(CDMA) Qualcomm
5. Terrestrial Trunked Radio(**TETRA**)

1.4.2.4 Η δυόμιση γενιά κινητών δικτύων (2.5G)

Με την έννοια 2.5G αναφερόμαστε στις βελτιώσεις που πραγματοποιήθηκαν στη τεχνολογία της δεύτερης γενιάς. Η διάκριση μεταξύ 2.5G και 2G είναι πολύ λεπτή. Οι τεχνολογίες που ενσωματώνονται στην δυόμιση γενιά κινητών δικτύων είναι οι εξής:

1. High-Speed Circuit-Switched Data (**HSCSD**): Με την τεχνολογία GSM οι ρυθμοί μετάδοσης υπήρξαν χαμηλοί και περιορίζονταν στα 9.6Kbps. Με την τεχνολογία HSCSD επιτυγχάνονται υψηλότεροι ρυθμοί μετάδοσης αφού επιτρέπει την δέσμευση και τη χρήση περισσότερων της μίας χρονοθυρίδας του TDMA πλαισίου. Το μειονέκτημα της τεχνολογίας αυτής είναι η χρήση της μεταγωγής κυκλώματος που οδηγεί σε σπατάλη πόρων του δικτύου αφού δεσμεύονται οι επιπλέον πόροι ακόμα και όταν δεν υπάρχει ανάγκη χρήσης τους.
2. General Packet Radio Services (**GPRS**): Η τεχνολογία GPRS χρησιμοποιεί μεταγωγή πακέτου και δεσμεύει διαθέσιμους πόρους μόνο όταν απαιτείται λήψη ή αποστολή δεδομένων επιτυγχάνοντας ρυθμούς μετάδοσης της τάξης των **115Kbps** έναντι 9.6Kbps του GSM. Η τεχνολογία αυτή παρέχει μεγαλύτερες δυνατότητες για μεταφορά δεδομένων σε σχέση με την HSCSD και αποτελεί αναπόσπαστο στοιχείο των κινητών δικτύων.
3. Enhanced Data Rates for Global Evolution (**EDGE**): Αποτελεί την τρίτη βελτίωση του GSM. Χρησιμοποιεί την τεχνική διαμόρφωσης Eight-Phase Shift Keying (8PSK) και επιτυγχάνει ρυθμό μετάδοσης τρεις φορές μεγαλύτερο από το ρυθμό του GSM.
4. Interim Standard **IS-95B** με τεχνική πρόσβασης CDMA.

1.4.2.5 Η τρίτη γενιά κινητών δικτύων (3G)

Τα δίκτυα τρίτης γενιάς αναπτύχθηκαν με σκοπό την παροχή υπηρεσιών σε οποιοδήποτε σημείο και οποιαδήποτε χρονική στιγμή. Χαρακτηρίζονται από μικροκυτταρική και πικοκυτταρική δομή. Χρησιμοποιούν μεταγωγή πακέτου και επιτυγχάνουν υψηλούς ρυθμούς μετάδοσης μέχρι 2Mbps. Παρέχουν μία πληθώρα υπηρεσιών όπως: παραδοσιακές υπηρεσίες τηλεφωνίας, υπηρεσίες μεταγωγής κυκλώματος, υπηρεσίες πολυμέσων (τηλεειδοποίηση, τηλεδιάσκεψη), πρόσβαση στο διαδίκτυο. Τα δίκτυα 3G αναφέρονται ως Universal Mobile Telecommunications System (UMTS) στην Ευρώπη και ως International Mobile Telecommunications 2000 (IMT2000) στον υπόλοιπο κόσμο και είναι τα εξής:

1. **3G W-CDMA**: Ευρωπαϊκό standard. Μετεξέλιξη του GSM αλλά βασίζεται σε Wideband-CDMA και μεταγωγή πακέτου.
2. **3G cdma2000**: Αμερικάνικο standard. Αποτελεί μετεξέλιξη του ISM-95
3. **3G TD-SCDMA**: Κινέζικο standard το οποίο βασίζεται στο GSM.

1.4.2.6 Η τρισύμψη γενιά κινητών δικτύων (3.5G)

Η γενιά 3.5G ενσωματώνει εκτός από την τεχνολογία W-CDMA τις τεχνολογίες High Speed Packet Access (HSPA) και την HSPA+. Η τεχνολογία HSPA αναπτύχθηκε προκειμένου να αυξήσει τη χωρητικότητα των δικτύων τρίτης γενιάς. Αναφέρεται σε βελτίωση που πραγματοποιείται στον κατερχόμενο ασύρματο σύνδεσμο High Speed Downlink Packet Access (HSDPA) και στον ανερχόμενο ασύρματο σύνδεσμο High Speed Uplink Packet Access (HSUPA). Οι τεχνολογίες HSDPA και HSUPA υποστηρίζουν ρυθμούς μετάδοσης **14.4Mbps** και **5.8Mbps** αντίστοιχα. Πλεονεκτήματα της HSPA αποτελούν οι υψηλές ταχύτητες, η αυξημένη διαδραστικότητα των υπηρεσιών και η παροχή υψηλής χωρητικότητας. Οι χρήστες έχουν την δυνατότητα να απολαμβάνουν μία πληθώρα ευρυζωνικών υπηρεσιών όπως γρήγορη και ευρυζωνική σύνδεση στο διαδίκτυο, VoIP, multi-player παιχνίδια, Mobile TV, video/MP3, streaming, video telephony, video conferencing. Η τεχνολογία HSPA+ προσδιορίζει όλες τις προσπάθειες για αναβάθμιση της τεχνολογίας HSPA.

1.4.2.7 Από το UMTS στο LTE

Η μετάβαση από το GSM στο UMTS σηματοδότησε την απαρχή μίας νέας πραγματικότητας για δίκτυα κινητών τηλεπικοινωνιών. Όπως φάνηκε στην πράξη τα 3G συστήματα δεν στάθηκαν αντάξια των προσδοκιών εφόσον δεν μπόρεσαν να συμμορφωθούν πλήρως με τα κριτήρια της ITU όπως αυτά διαμορφώνονται από τις προδιαγραφές IMT-2000. Αυτό οφείλεται σε παράγοντες που σχετίζονται με την αρχιτεκτονική τους σε συνδυασμό με τις επικοινωνιακές απαιτήσεις της εποχής μας.

Όπως αναφέραμε και προηγουμένως το UMTS βασίστηκε στην υποδομή του GSM. Ως εκ τούτου διατήρησε την τεχνολογία της μεταγωγής κυκλώματος, σε συνδυασμό με την μεταγωγή πακέτου, για τη μετάδοση φωνητικών υπηρεσιών στα πλαίσια της προς τα πίσω συμβατότητας με τον προκάτοχό του. Η μεταγωγή κυκλώματος αν και κρίνεται αποδοτική για το GSM θεωρείται ακατάλληλη και αναποτελεσματική για τις απαιτήσεις των δικτύων τρίτης γενιάς λόγω της μη ορθής διαχείρισης των περιορισμένων πόρων και αδυνατώντας να υποστηρίξει μεταβαλλόμενο ρυθμό μετάδοσης.

Παράλληλα από τα μέσα περίπου του 2000 παρατηρείται μία ραγδαία αύξηση της ποσότητας των δεδομένων που διακινούνται στα δίκτυα. Η κατάσταση αυτή είναι απόρροια της εμφάνισης και χρήσης εξελιγμένων τεχνολογικών συσκευών (smartphones, 3G tablets, laptops) οι οποίες ταυτίστηκαν εξ' ολοκλήρου με την ασύρματη πρόσβαση στο Διαδίκτυο και παρείχαν πλήθος εφαρμογών και υπηρεσιών δεδομένων. Επιπροσθέτως, σε αντίθεση με το GSM όπου η μετάδοση φωνητικών κλήσεων υπερτερεί συγκριτικά, στην εποχή του 3G διακρίνουμε διαφορετικά και ποικίλα είδη τηλεπικοινωνιακής κίνησης προερχόμενα από το επικοινωνιακό προφίλ του εκάστοτε συνδρομητή. Η συνύπαρξη πολλαπλών ροών πληροφορίας με ξεχωριστά χαρακτηριστικά μετάδοσης αποτελεί μία πραγματική πρόκληση για την υποδομή και την εύρυθμη λειτουργία ενός κινητού δικτύου. Στα παραπάνω έρχεται να προστεθούν και οι καθυστερήσεις (της τάξης των 100ms) οι οποίες σε συνδυασμό με τους χαμηλούς ρυθμούς μετάδοσης του UMTS δημιουργούν προβλήματα στην αξιοπιστία της μετάδοσης απαιτητικών πολυμεσικών υπηρεσιών.

Οι συνεχείς αναβαθμίσεις μέσω των 3.5G προτύπων με σκοπό την αύξηση της χωρητικότητας των 3G δικτύων και την εισαγωγή νέων δυνατοτήτων σε συνδυασμό με την προσπάθεια διατήρησης αντίστροφης συμβατότητας με παλαιότερους τύπους συσκευών εισήγαγαν αυξημένη πολυπλοκότητα της δικτυακής αρχιτεκτονικής.

Ο συνδυασμός όλων των προαναφερθέντων παραγόντων κατέστησε επιτακτική την ανάγκη υλοποίησης ενός νέου προτύπου ικανού να ανταποκριθεί επιτυχώς των σύγχρονων απαιτήσεων του τηλεπικοινωνιακού τοπίου, βιώσιμου για χρονικό διάστημα μεγαλύτερο της 10ετίας και απαλλαγμένου από τις παθογένειες των προκατόχων του. Η διαδικασία ανάπτυξης των κινητών δικτύων τέταρτης γενιάς

ξεκίνησε το 2004 και ολοκληρώθηκε το 2008 με την παρουσίαση της *έκδοσης 8* του Long Term Evolution – **LTE**.

Το LTE αποτελείται από ένα δίκτυο κορμού με τεχνολογία IP, υποστηρίζει αποκλειστικά μεταγωγή πακέτου, επιτυγχάνει ρυθμούς της τάξης των **100Mbps** και **50Mbps** για την κατερχόμενη και ανερχόμενη ζεύξη αντίστοιχα ενώ εξασφαλίζει διαλειτουργικότητα με τις 3GPP και non-3GPP τεχνολογίες.

Στόχος του 3GPP είναι η υιοθέτηση του LTE από όσο το δυνατόν περισσότερους παρόχους επικοινωνιών και η καθιέρωσή του ως παγκόσμιο πρότυπο. Το 2009 παρουσιάζεται η *έκδοση 9* ως εξέλιξη της έκδοσης 8 και περιλαμβάνει κάποιες μικρές τροποποιήσεις ως προς την αρχιτεκτονική.

1.4.2.8 Από το LTE στο LTE - Advanced.

Το 2008 ο Διεθνής Οργανισμός Τηλεπικοινωνιών ITU δημοσιεύει μία σειρά προδιαγραφών υπό την ονομασία **IMT-Advanced** με τις οποίες θα πρέπει να συμμορφώνεται πλήρως ένα σύστημα τέταρτης γενιάς. Έκτοτε η 3GPP με οδηγό το IMT-Advanced μελετάει τους τρόπους εξέλιξης του LTE. Το αποτέλεσμα της μελέτης αυτής αποτυπώνεται στην *έκδοση 10* η οποία ορίζει το πρότυπο του **LTE – Advanced**.

Το LTE – Advanced επιτυγχάνει ρυθμούς μετάδοσης **1000Mbps** στο Downlink και **500Mbps** Uplink, επιδεικνύει φασματική απόδοση 4.5 έως 7 φορές υψηλότερη της έκδοσης 6 του WCDMA για την κατερχόμενη ζεύξη και 3.5 έως 6 φορές μεγαλύτερη αναφορικά με την ανερχόμενη ζεύξη ενώ υποστηρίζει τη διαλειτουργικότητα με το LTE.

1.4.2.9 Η τέταρτη γενιά κινητών δικτύων (4G).

Σύμφωνα με την ITU ένα σύστημα χαρακτηρίζεται ως 4G μόνο αν πληρεί με επιτυχία όλες τις απαιτήσεις που αναγράφονται ως IMT-Advanced. Σύμφωνα με το IMT-Advanced τα συστήματα τέταρτης γενιάς πρέπει να είναι ικανά για επίτευξη ρυθμών της τάξης του **1Gbps** (Downlink) **0.5Gbps** (Uplink), θα πρέπει να εξασφαλίζουν υψηλή φασματική απόδοση και να είναι συμβατά με τις προηγούμενες εκδόσεις.

Τα δύο συστήματα που πληρούν εξ' ολοκλήρου τις προδιαγραφές της ITU και αναφέρονται ως 4G είναι το **LTE – Advanced (Release 10)** της 3GPP και **802.16m Mobile WiMAX 2.0** της IEEE. Το LTE (Release 8 και 9) αν και πληρεί αρκετές από

τις απαιτήσεις του IMT-Advanced εν τέλει δεν συμμορφώνεται πλήρως με αυτές και ως εκ τούτου σύμφωνα με τον ορισμό της ITU χαρακτηρίζεται ως σύστημα 3.9G. Ωστόσο στην παγκόσμια αγορά των Τηλεπικοινωνιών περιγράφεται ως δίκτυο 4G.

1.5 Συμπεράσματα

Στο κεφάλαιο αυτό παρουσιάσαμε την εξελικτική πορεία των δικτύων κινητών επικοινωνιών ξεκινώντας από την εποχή της συμβατικής κινητής τηλεφωνίας και φτάνοντας μέχρι τα σύγχρονα δίκτυα LTE και LTE-Advanced. Αναλύσαμε τις συνθήκες που πυροδότησαν τις εκάστοτε εξελίξεις της κάθε περιόδου, τους οργανισμούς που διαμόρφωσαν το σημερινό τηλεπικοινωνιακό τοπίο καθώς και τα χαρακτηριστικά της κάθε γενιάς των συστημάτων αυτών.

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 2^ο

Αρχιτεκτονική του Evolved Packet System (EPS)

2.1 Εισαγωγή

Στο παρόν κεφάλαιο αρχικά εστιάζουμε στην πορεία που ακολουθήθηκε μέχρι την τυποποίηση του προτύπου LTE και παρουσιάζουμε τις προδιαγραφές και τις απαιτήσεις του όπως αυτές διαμορφώθηκαν από τον οργανισμό 3GPP. Εν συνεχεία αναλύουμε την αρχιτεκτονική του δικτύου πρόσβασης E-UTRAN και του δικτύου κορμού EPC. Περιγράφουμε την εσωτερική δομή τους, τα πρωτόκολλα επικοινωνίας και τον τρόπο μεταφοράς των δεδομένων του χρήστη και της σηματοδότησης ανάμεσα στους κόμβους του δικτύου μέσω της χρήσης του φορέα EPS.

2.2 Long Term Evolution (LTE)

Το LTE αποτελεί τη φυσική εξέλιξη των δικτύων GSM / UMTS. Το 2004 ο οργανισμός 3GPP ξεκίνησε μία μελέτη σχετικά με τη μακροπρόθεσμη εξέλιξη του UMTS (long term evolution of UMTS) με σκοπό να διατηρηθούν τα 3GPP συστήματα κινητών επικοινωνιών βιώσιμα και ανταγωνιστικά σε βάθος χρόνου μεγαλύτερο της 10ετίας και να επεκταθούν σε παγκόσμιο επίπεδο.

Χρονολογικά η διαδικασία τυποποίησης του LTE εγκαινιάστηκε το Νοέμβριο του 2004 στο Τορόντο του Καναδά με τη διοργάνωση του “Radio Access Network Evolution Workshop”. Το Workshop ήταν ανοιχτό σε όλους τους ενδιαφερόμενους φορείς του τομέα των Τηλεπικοινωνιών όπως εταιρείες, φορείς εκμετάλλευσης, κατασκευαστές τηλεπικοινωνιακού εξοπλισμού, ερευνητικά ινστιτούτα, μέλη και μη μέλη του 3GPP οργανισμού.

Το αντικείμενο του συνεδρίου αφορούσε την ανάγκη βελτίωσης και ανάπτυξης των 3GPP προτύπων (UMTS) και το μέλλον των κινητών επικοινωνιών. Διατυπώθηκαν πρώιμες σκέψεις και αρχικές εκτιμήσεις αναφορικά με τους στόχους επίδοσης των κινητών δικτύων νέας γενιάς, τις απαιτούμενες προδιαγραφές των νέων προτύπων και τις υποψήφιες τεχνολογίες για την υποστήριξή τους.

Απόρροια των συζητήσεων ήταν η δημιουργία μίας επίσημης έκθεσης μελέτης του 3GPP που αφορούσε στην ανάπτυξη ενός νέου δικτύου ασύρματης πρόσβασης ικανού να διεκπεραιώσει τις νέες προδιαγραφές οι οποίες συνοψίζονται ως εξής:

- Βελτίωση της γεωγραφικής κάλυψης και της χωρητικότητας του δικτύου

- Αύξηση του ρυθμού μετάδοσης
- Ελαχιστοποίηση των συνολικών καθυστερήσεων
- Μεγαλύτερη ευελιξία και υψηλή απόδοση του ραδιοφάσματος
- Αδιάλειπτη παροχή υπηρεσιών και απεριόριστη ελευθερία στην κινητικότητα του χρήστη
- Υψηλή ενεργειακή απόδοση των φορητών συσκευών
- Μειωμένη αρχιτεκτονική πολυπλοκότητα
- Ελαχιστοποίηση του κόστους και των δαπανών υλοποίησης, χρήσης, συντήρησης και επέκτασης της υποδομής του δικτύου

Έπειτα από τέσσερα χρόνια μελέτης, εργασιών και αμοιβαίας συνεισφοράς όλων των ενεργών μελών του τομέα των Τηλεπικοινωνιών το Δεκέμβριο του 2008 παρουσιάζεται επίσημα πλέον η έκδοση 8 (Release 8) του προτύπου LTE, η οποία καλύπτει όλα τα θέματα που αφορούν την βελτιωμένη ασύρματη διεπαφή αέρα και τη νέα αρχιτεκτονική του δικτύου.

Στο σημείο αυτό θα πρέπει να διευκρινίσουμε ότι ο όρος 3GPP Long Term Evolution ή απλώς **LTE** αναφέρεται και προσδιορίζει της τεχνολογία ασύρματης πρόσβασης μέσω του Evolved – Universal Terrestrial Radio Access Network (E-UTRAN) για την επικοινωνία της κινητής συσκευής με το δίκτυο κορμού (Core Network - CN).

Παρά τον σαφή ορισμό που αποδίδεται στην έννοια του LTE από τον οργανισμό 3GPP, ο όρος Long Term Evolution έχει γενικευτεί και χαρακτηρίζει τη συνολική αρχιτεκτονική του δικτύου (δίκτυο πρόσβασης και κορμού). Στα πλαίσια της παρούσας εργασίας θα συμπορευτούμε με τη γενίκευση αυτή. Σε σημεία όπου θα αναφερόμαστε στο ασύρματο τμήμα του δικτύου θα επικαλούμαστε τον όρο E-UTRAN.

Ωστόσο η έκδοση 8 του προτύπου συνοδεύεται και από την εξέλιξη των θεμάτων που δεν αφορούν μόνο την ασύρματη πρόσβαση αλλά και το δίκτυο κορμού. Οι αλλαγές αυτές περιγράφονται υπό τον όρο System Architecture Evolution (**SAE**) ο οποίος περιλαμβάνει το εξελιγμένο δίκτυο κορμού Evolved Packet Core (**EPC**). Το δίκτυο ασύρματης πρόσβασης (**LTE**) μαζί με το δίκτυο κορμού (SAE) υλοποιούν το Evolved Packet System (**EPS**) που περιγράφει τη συνολική αρχιτεκτονική του νέου δικτύου.

Η εξελικτική πορεία των προτύπων του UMTS καθώς και η φιλοσοφία ανάπτυξης του LTE στηρίχθηκε σε δύο βασικές σχεδιαστικές αρχές. Η μεν πρώτη αφορά στον τρόπο αξιοποίησης της υπάρχουσας γνώσης και εμπειρίας που προϋπήρχε από τη βελτίωση των 3G και 3.5G συστημάτων. Το LTE να μεν αποτελεί την εξέλιξη του UMTS ωστόσο αναπτύχθηκε ως ένα εντελώς καινούριο πρότυπο με νέα χαρακτηριστικά λειτουργίας και δυνατότητες σε αντίθεση με ότι συνηθιζόταν μέχρι και τα πρότυπα 3.5G. Δόθηκε ιδιαίτερη σημασία και προσοχή ώστε στο νέο πρότυπο

να συμπεριληφθούν μόνο τα στοιχεία εκείνα των προηγούμενων εκδόσεων για τα οποία καθίσταται επιτακτική ανάγκη.

Η δεύτερη αρχή εστιάζει στη μέθοδο υλοποίησης της υποδομής του νέου δικτύου. Η αρχιτεκτονική του LTE βασίστηκε στην αποσύνδεση του δικτύου ασύρματης πρόσβασης από την εξέλιξη του δικτύου κορμού. Αυτό σημαίνει ότι σχεδιάζουμε τις λειτουργικές συνιστώσες του συστήματος σε συμμόρφωση με τις προδιαγραφές που έχουν τεθεί χωρίς όμως να υπάρχει σαφής αναφορά και συνάρτηση ως προς τις φυσικές οντότητες που το απαρτίζουν. Με τον τρόπο αυτό παρέχεται η δυνατότητα στους διαχειριστές του δικτύου να μπορούν να χωρίσουν ή να ενώσουν κάποια από τα λειτουργικά στοιχεία στη φυσική τους υλοποίηση.

Οι βασικές αυτές αρχές συνετέλεσαν στην μείωση της αρχιτεκτονικής πολυπλοκότητας, την βέλτιστη αξιοποίηση των δυνατοτήτων του νέου συστήματος και το μυστικό για την επίτευξη όλων των απαιτούμενων προδιαγραφών και την ανάδειξη του LTE σε δίκτυο τέταρτης γενιάς με παγκόσμια απήχηση.

Η έκδοση 8 περιελάμβανε όλα τα σημαντικά χαρακτηριστικά του LTE προτύπου. Ωστόσο το 2009 δημοσιεύτηκε η έκδοση 9 με κάποιες μικρές τροποποιήσεις σχετικά με το E-UTRAN και το SAE.

2.3 Προδιαγραφές και απαιτήσεις του LTE

Το LTE είναι το πρώτο 3GPP πρότυπο με τα εξής καινοτόμα χαρακτηριστικά:

- Χρήση του πρωτοκόλλου IP για την παροχή συνεχούς συνδεσιμότητας ανάμεσα στη φορητή συσκευή (UE) και το δίκτυο πακέτων δεδομένων PDN και την υποστήριξη απόλυτης ελευθερίας της κινητικότητας του χρήστη.
- Αποκλειστική χρήση της τεχνολογίας μεταγωγής πακέτου για όλους τους τύπους δεδομένων συμπεριλαμβανομένων και των υπηρεσιών φωνής.
- Επίπεδη αρχιτεκτονική του δικτύου με σημαντική μείωση του αριθμού των λειτουργικών οντοτήτων και την ενσωμάτωση μόνο των απαιτούμενων δυνατών.
- Ενοποίηση όλων των προϋπαρχόντων δικτύων (2G, 3G, PDNs...) μέσω της διατήρησης της συμβατότητας και της υποστήριξης διαφορετικών τεχνολογιών ασύρματης πρόσβασης (Radio Access Technologies - RATs).
- Αποσύνδεση των φορέων εκμετάλλευσης και των κατασκευαστών τηλεπικοινωνιακού εξοπλισμού μέσω της χρήσης ανοιχτών διεπαφών για την

υποστήριξη συσκευών με διαφορετικά τεχνικά χαρακτηριστικά και παραμέτρους πρόσβασης.

Οι προδιαγραφές και οι απαιτήσεις του LTE προτύπου όπως αυτές καθορίζονται από την έκδοση 8 είναι οι κάτωθι:

1. Μέγιστος ρυθμός μετάδοσης (peak data rate)

Ως peak data rate ορίζουμε το μέγιστο ρυθμό απόδοσης ενός χρήστη που μπορεί να επιτευχθεί υπό τις εξής προϋποθέσεις:

- Χρήση του μέγιστου δυνατού εύρους ζώνης
- Εφαρμογή του υψηλότερου σεναρίου διαμόρφωσης και κωδικοποίησης (MCS)
- Χρήση του μέγιστου αριθμού κεραιών που υποστηρίζονται από το πρότυπο

Οι απαιτήσεις του LTE για το μέγιστο ρυθμό μετάδοσης για εύρος ζώνης 20MHz είναι τα **100Mbps** με φασματική απόδοση **5bps/Hz** για την κατερχόμενη ζεύξη και **50Mbps** με φασματική απόδοση **2.5bps/Hz** για την ανερχόμενη ζεύξη. Στα πλαίσια ενός ισορροπημένου συστήματος και της διασφάλισης ομοιομορφίας στην παροχή υπηρεσιών το LTE εγγυάται αυξημένους ρυθμούς μετάδοσης ακόμα και στα όρια της κυψέλης

2. Υψηλός ρυθμός απόδοσης κυψέλης (Cell throughput)

Η απόδοση του επιπέδου ασύρματης πρόσβασης αντικατοπτρίζεται από την απόδοση σε επίπεδο κυττάρου. Η απόδοση της κυψέλης αποτελεί πολύ σημαντική παράμετρο αφού καθορίζει τον συνολικό αριθμό των κυττάρων που απαιτούνται για την κάλυψη της γεωγραφικής περιοχής και την εξυπηρέτηση της χωρητικότητας του δικτύου διαμορφώνοντας εν τέλει και το κόστος υλοποίησης της υποδομής του. Ως εκ τούτου πρέπει να επιτυγχάνεται όσο το δυνατόν υψηλότερο cell throughput.

3. Κινητικότητα (Mobility)

Το LTE υποστηρίζει μεγάλο εύρος ταχυτήτων κίνησης του χρήστη. Για χαμηλές ταχύτητες κίνησης από **0 έως 15km/h** το δίκτυο ασύρματης πρόσβασης E-UTRAN έχει εξελιχθεί με γνώμονα την επίτευξη της βέλτιστης λειτουργίας του ενώ προβλέπεται υψηλή απόδοση και υποστήριξη για ταχύτητες από **15 έως 120km/h** και **120 έως 350km/h**. Σύμφωνα με τις προδιαγραφές αναμένεται η υποστήριξη κίνησης ακόμα και για υπερυψηλές ταχύτητες της τάξης των **500km/h** σε συνάρτηση πάντα με το χρησιμοποιούμενο εύρος ζώνης.

4. Υψηλή φασματική απόδοση (Spectrum efficiency)

Το LTE επιτυγχάνει 3 με 4 φορές μεγαλύτερη απόδοση φάσματος για την κατερχόμενη ζεύξη και 2 έως 3 φορές υψηλότερη για την ανερχόμενη ζεύξη συγκριτικά με την έκδοση 6 του WCDMA.

5. Ευέλικτη διαχείριση φάσματος (Spectrum flexibility)

Το δίκτυο ασύρματης πρόσβασης E-UTRAN υποστηρίζει μεταβαλλόμενο εύρος ζώνης που κυμαίνεται από **1.4 έως και 20MHz** επιτυγχάνοντας έτσι μεγαλύτερη ευελιξία και βέλτιστη διαχείριση του ραδιοφάσματος.

6. Γεωγραφική κάλυψη (Coverage)

Υποστήριξη κυττάρων μεταβλητού μεγέθους από μερικές δεκάδες μέτρα έως και 100 km. Το ιδανικό μέγεθος κυψέλης για βέλτιστη λειτουργία είναι τα **5km**. Με μέγεθος **30km** η απόδοση είναι αρκετά καλή ενώ με μέγεθος **100km** η απόδοση του δικτύου είναι ικανοποιητική. Σε αστικά περιβάλλοντα και γενικότερα σε περιβάλλοντα πόλεων όπου χρησιμοποιούνται υψηλές συχνότητες για την υποστήριξη υψηλών ευρυζωνικών ταχυτήτων πρόσβασης η κάθε κυψέλη του δικτύου έχει μέγεθος το πολύ **1km**.

7. Καθυστέρηση

Η παράμετρος της καθυστέρησης αποτελεί σημαντικό μέτρο της απόδοσης ενός συστήματος ιδίως όταν αναφερόμαστε στην υποστήριξη real time και διαδραστικών εφαρμογών όπου ο χρόνος είναι παράγοντας ζωτικής σημασίας. Στο LTE εξετάζουμε δύο είδη καθυστερήσεων, της μετάδοσης και της αλλαγής κατάστασης. Ως καθυστέρηση μετάδοσης ορίζεται το χρονικό διάστημα ανάμεσα στην πρώτη αποστολή ενός πακέτου δεδομένων και στη λήψη της επιβεβαίωσης (ACK ή NACK). Ο χρόνος αυτός σύμφωνα με το πρότυπο είναι μικρότερος από **5ms**. Ως καθυστέρηση αλλαγής κατάστασης ορίζεται ο χρόνος που απαιτείται για τη μετάβαση της συσκευής από RRC_IDLE (αδρανής) σε RRC_CONNECTED (ενεργή). Η καθυστέρηση αυτή είναι μικρότερη από **100ms**.

8. Χωρητικότητα

Ως χωρητικότητα ορίζουμε το μέγιστο αριθμό ενεργών συνδρομητών που βρίσκονται σε μία κυψέλη και μπορούν να υποστηριχθούν από πλευράς σηματοδοσίας. Σύμφωνα με τις προδιαγραφές υποστηρίζονται τουλάχιστον **200 ενεργές συνδέσεις** δεδομένων σε κάθε κανάλι συχνότητας 5MHz και **400 ενεργές συνδέσεις** για μεγαλύτερο εύρος ζώνης.

9. Συνύπαρξη και διαλειτουργικότητα με άλλες τεχνολογίες ασύρματης πρόσβασης

Το LTE επιτυγχάνει τη διαλειτουργικότητα με τα προϋπάρχοντα 3GPP (GSM, EDGE, UMTS) και μη 3GPP (cdma2000, WiMAX) πρότυπα καθώς και τη υποστήριξη διαφορετικών 3GPP τεχνολογιών πρόσβασης (GERAN / UTRAN). Έτσι ο συνδρομητής απολαμβάνει συνεχή συνδεσιμότητα και αδιάλειπτη παροχή υπηρεσιών ακόμα και σε περιοχές όπου δεν υφίσταται κάλυψη από το LTE χρησιμοποιώντας το υφιστάμενο δίκτυο GSM/GPRS, WCDMA ή cdma2000.

10. Υποστήριξη Multimedia Broadcast Multicast Service (MBMS)

Στην έκδοση 9 ενσωματώνεται η δυνατότητα παροχής Multimedia Broadcast Multicast υπηρεσιών όπως για παράδειγμα το mobile TV.

11. Μειωμένο κόστος ανά bit λόγω της βελτιωμένης φασματικής απόδοσης**12. Αυξημένη ενεργειακή απόδοση**

Η γρήγορη μετάβαση της κινητής συσκευής από την αδράνεια (idle) σε ενεργή κατάσταση (active) επιτρέπει στα τερματικά να παραμένουν αδρανή περισσότερο χρόνο μειώνοντας με αυτό τον τρόπο αισθητά την κατανάλωση ενέργειας και επιτυγχάνοντας υψηλή ενεργειακή απόδοση.

Στα σχήμα που ακολουθεί αποτυπώνονται με συνοπτικό τρόπο οι στόχοι της απόδοσης του προτύπου LTE για την κατερχόμενη και ανερχόμενη ζεύξη καθώς και για το συνολικό σύστημα.

		Absolute requirement	Release 6 (for comparison)	Comments
Downlink	Peak transmission rate	> 100 Mbps	14.4 Mbps	LTE in 20 MHz FDD, 2×2 spatial multiplexing. Reference: HSDPA in 5 MHz FDD, single antenna transmission
	Peak spectral efficiency	> 5 bps/Hz	3 bps/Hz	
	Average cell spectral efficiency	> 1.6–2.1 bps/Hz/cell	0.53 bps/Hz/cell	LTE: 2×2 spatial multiplexing, Interference Rejection Combining (IRC) receiver [3]. Reference: HSDPA, Rake receiver [4], 2 receive antennas
	Cell edge spectral efficiency	> 0.04–0.06 bps/Hz/user	0.02 bps/Hz/user	As above, 10 users assumed per cell
	Broadcast spectral efficiency	> 1 bps/Hz	N/A	Dedicated carrier for broadcast mode
Uplink	Peak transmission rate	> 50 Mbps	11 Mbps	LTE in 20 MHz FDD, single antenna transmission. Reference: HSUPA in 5 MHz FDD, single antenna transmission
	Peak spectral efficiency	> 2.5 bps/Hz	2 bps/Hz	
	Average cell spectral efficiency	> 0.66–1.0 bps/Hz/cell	0.33 bps/Hz/cell	LTE: single antenna transmission, IRC receiver [3]. Reference: HSUPA, Rake receiver [4], 2 receive antennas
	Cell edge spectral efficiency	> 0.02–0.03 bps/Hz/user	0.01 bps/Hz/user	As above, 10 users assumed per cell
System	User plane latency (two way radio delay)	< 10 ms		LTE target approximately one fifth of Reference.
	Connection set-up latency	< 100 ms		Idle state → active state
	Operating bandwidth	1.4–20 MHz	5 MHz	(initial requirement started at 1.25 MHz)
	VoIP capacity	NGMN preferred target expressed in [2] is > 60 sessions/MHz/cell		

Σχήμα 2.1: Στόχοι απόδοσης του LTE

2.4 Αρχιτεκτονική του LTE

Το πρότυπο του LTE αναπτύχθηκε εξ' αρχής με σκοπό την εξέλιξη του δικτύου ασύρματης πρόσβασης του UMTS (evolved UTRAN) με βασικές προϋποθέσεις την υποστήριξη αποκλειστικά υπηρεσιών μεταγωγής πακέτου, την παροχή συνεχούς IP συνδεσιμότητας ανάμεσα στο χρήστη και τα δίκτυα πακέτων δεδομένων, την διασφάλιση αδιάλειπτης παροχής υπηρεσιών και την απόλυτη ελευθερία κίνησης του συνδρομητή. Η εξέλιξη αυτή περιγράφεται από τους όρους Long Term Evolution (LTE) και System Architecture Evolution (SAE). Ο όρος LTE αναφέρεται στην βελτίωση του δικτύου ασύρματης πρόσβασης και ο όρος SAE στο δίκτυο κορμού.

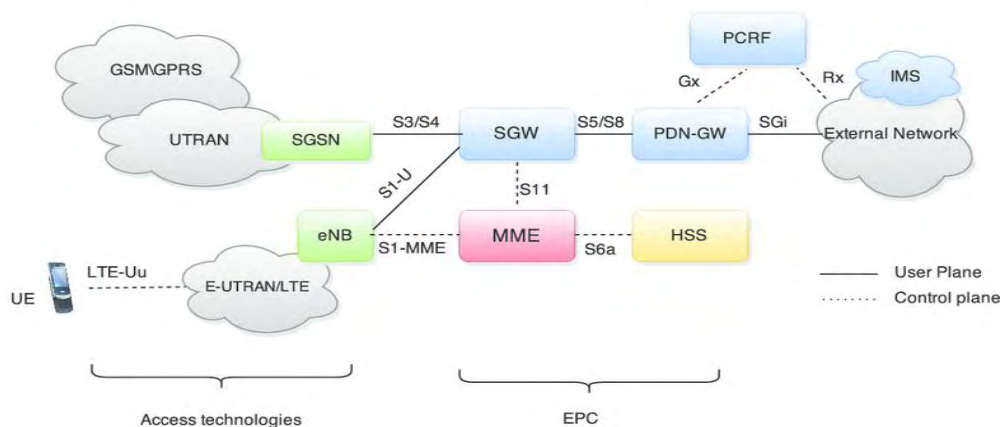
2.4.1 Αρχιτεκτονική υψηλού επιπέδου

Η αρχιτεκτονική του δικτύου απαρτίζεται από τρεις βασικές συνιστώσες: τον φορητό εξοπλισμό του χρήστη (User Equipment - **UE**), το δίκτυο πρόσβασης (Access Network - **AN**) και το δίκτυο κορμού (Core Network - **CN**).

Το δίκτυο ασύρματης πρόσβασης αποτελεί την εξέλιξη του αντίστοιχου δικτύου του UMTS και ονομάζεται Evolved – Universal Terrestrial Radio Access Network (**E - UTRAN**). Περιγράφεται ως LTE και είναι υπεύθυνο για τη διασύνδεση του εξοπλισμού του χρήστη στο δίκτυο κορμού.

Το εξελιγμένο δίκτυο κορμού (CN) περιγράφεται ως SAE και περιλαμβάνει το Evolved Packet Core (**EPC**). Σκοπός του είναι η παροχή IP σύνδεσης ανάμεσα στο χρήστη και το δίκτυο πακέτων δεδομένων (PDN) και η υποστήριξη αποκλειστικά μεταγωγής πακέτου.

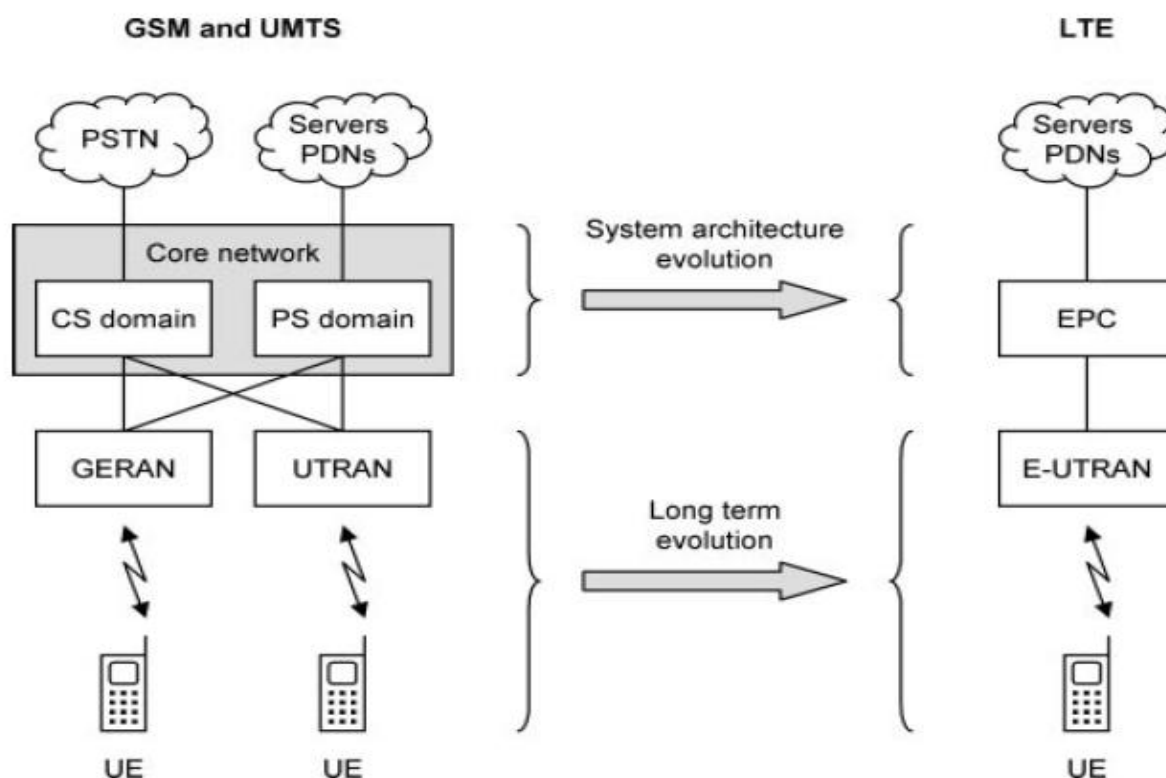
Το **LTE** (E-UTRAN) μαζί με το **SAE** (EPC) συγκροτούν το συνολικό σύστημα υπό την ονομασία Evolved Packet System (**EPS**). Το EPS μέσω του E-UTRAN και του EPC παρέχει υποστήριξη πολλαπλών λειτουργιών όπως ο έλεγχος πρόσβασης στο δίκτυο, η επιτυχής δρομολόγηση και μεταφορά πακέτων, η ασφάλεια των πληροφοριών, η αποτελεσματική διαχείριση της κινητικότητας, η αποδοτική χρήση των πόρων καθώς και λειτουργίες ελέγχου και εποπτείας του συνολικού δικτύου. Η αρχιτεκτονική του EPS απεικονίζεται στο σχήμα 2.2.



Σχήμα 2.2: Αρχιτεκτονική του EPS

Ο εξοπλισμός του χρήστη συνδέεται με το E-UTRAN μέσω της διεπαφής αέρα **Uu**. Το E-UTRAN επικοινωνεί με το δίκτυο κορμού EPC μέσω της διεπαφής **S1** και τέλος το EPC συνδέεται με τον έξω κόσμο (PDNs, Servers...) μέσω της διεπαφής **SGi**.

Το σχήμα 2.3 παρουσιάζει την εξέλιξη της αρχιτεκτονικής του LTE από το GSM και το UMTS.



Σχήμα 2.3: Εξέλιξη του LTE από το GSM / UMTS

Το νέο δίκτυο κορμού EPC αποτελείται μόνο από το τμήμα μεταγωγής πακέτου (**PS domain**) με το τμήμα μεταγωγής κυκλώματος (CS domain) να μην ενσωματώνεται πλέον στην αρχιτεκτονική. Στο EPC όλοι οι τύποι δεδομένων συμπεριλαμβανομένης και της φωνής προωθούνται με τη χρήση IP πακέτων. Οι υπηρεσίες φωνής υποστηρίζονται από το IP υποσύστημα πολυμέσων (IP Multimedia Subsystem - **IMS**) και μεταδίδονται χρησιμοποιώντας την τεχνολογία Voice Over IP (**VoIP**).

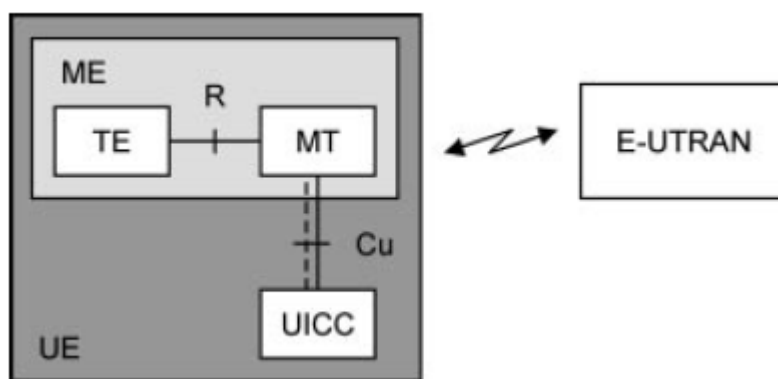
Το σύστημα EPS εσωτερικά αποτελείται από λογικούς κόμβους οι οποίοι επικοινωνούν μεταξύ τους μέσω διεπαφών. Στις ενότητες που ακολουθούν θα αναλύσουμε εκτενώς τις τρεις δομικές συνιστώσες της αρχιτεκτονικής του συνολικού δικτύου και θα αναφερθούμε στα λειτουργικά στοιχεία που συνθέτουν τα δίκτυα πρόσβασης και κορμού.

2.4.2 Αρχιτεκτονική του εξοπλισμού χρήστη (UE)

Ως εξοπλισμός χρήστη (UE) ορίζεται οποιαδήποτε τερματική συσκευή μπορεί να χρησιμοποιηθεί για την επικοινωνία ανάμεσα στο χρήστη και το δίκτυο LTE. Μπορεί να είναι ένα smartphone, ένα tablet ή ένα laptop με μία plug in LTE κάρτα. Λειτουργικά ο UE είναι μία πλατφόρμα για την υποστήριξη εφαρμογών επικοινωνίας, ανταλλάσσει μηνύματα σηματοδότησης με το δίκτυο και εκκινεί όλες τις διαδικασίες εγκαθίδρυσης, διαχείρισης και αποδέσμευσης των συνδέσεων.

Ο εξοπλισμός χρήστη αποτελείται από τον κινητό εξοπλισμό (Mobile Equipment - ME), ο οποίος στην περίπτωση ενός κινητού τηλεφώνου αντιστοιχεί σε μία συσκευή, και μία έξυπνη κάρτα με την ονομασία Universal Integrated Circuit Card (UICC), την γνωστή μας SIM. Ο κινητός εξοπλισμός ME δύναται να αναλυθεί περαιτέρω στις εξής δομικές μονάδες: το κινητό τερματισμού (Mobile Termination - MT) για το χειρισμό όλων των λειτουργιών επικοινωνίας και τον τερματικό εξοπλισμό (Terminal Equipment - TE) για τον τερματισμό των ροών δεδομένων.

Στην κάρτα UICC εκτελείται η εφαρμογή Universal Subscriber Identity Module (USIM) στην οποία αποθηκεύονται προσωπικά δεδομένα του χρήστη όπως ο αριθμός τηλεφώνου, η ταυτότητα του δικτύου όπου είναι εγγεγραμμένος καθώς και παράμετροι για την ασφάλεια και την κρυπτογράφηση των επικοινωνιών.



Σχήμα 2.4: Αρχιτεκτονική του εξοπλισμού χρήστη

Το πρότυπο του LTE στις εκδόσεις 8 και 9 ορίζει πέντε κατηγορίες τερματικών συσκευών ανάλογα με τις δυνατότητες και τα τεχνικά χαρακτηριστικά λειτουργίας που ενσωματώνουν όπως ο μέγιστος ρυθμός μετάδοσης για την κατερχόμενη και ανερχόμενη ζεύξη, ο αριθμός κεραιών που χρησιμοποιούν, ο τύπος διαμόρφωσης, οι υποστηριζόμενες τεχνολογίες πρόσβασης. Κάθε τερματικός εξοπλισμός κοινοποιεί τα χαρακτηριστικά αυτά στο σταθμό βάσης (eNodeB) μέσω της αποστολής μηνυμάτων σηματοδότησης κατά τη διαδικασία επικοινωνίας για την δημιουργία σύνδεσης. Στον πίνακα 2.1 παρουσιάζονται συγκεντρωτικά τα τεχνικά χαρακτηριστικά για κάθε μία από τις 5 κατηγορίες εξοπλισμού.

	UE category				
	1	2	3	4	5
Supported downlink data rate (Mbps)	10	50	100	150	300
Supported uplink data rate (Mbps)	5	25	50	50	75
Number of receive antennas required	2	2	2	2	4
Number of downlink MIMO layers supported	1	2	2	2	4
Support for 64QAM modulation in downlink	✓	✓	✓	✓	✓
Support for 64QAM modulation in uplink	✗	✗	✗	✗	✓
Relative memory requirement for physical layer processing (normalized to category 1 level)	1	4.9	4.9	7.3	14.6

Πίνακας 2.1: Κατηγορίες UE του LTE που υποστηρίζονται στις εκδόσεις 8 και 9.

Προκειμένου να αποφευχθούν καταστάσεις υπερβολικής σηματοδοσίας για την υποστήριξη και συμβατότητα κινητών συσκευών διαφορετικών προδιαγραφών, το LTE εσκεμμένως απέφυγε την τυποποίηση ενός μεγάλου αριθμού από προαιρετικά χαρακτηριστικά για τα UEs με τη φιλοσοφία ότι ένα χαρακτηριστικό πρέπει να είναι ιδιαίτερα χρήσιμο και να αξίζει πραγματικής ενσωμάτωσης στο νέο πρότυπο.

Όλες οι φορητές συσκευές και των πέντε κατηγοριών υποστηρίζουν διευθύνσεις IPv4, IPv6 ή dual stack IPv4/IPv6 και μπορούν να επεξεργαστούν σήματα εύρους ζώνης 20MHz.

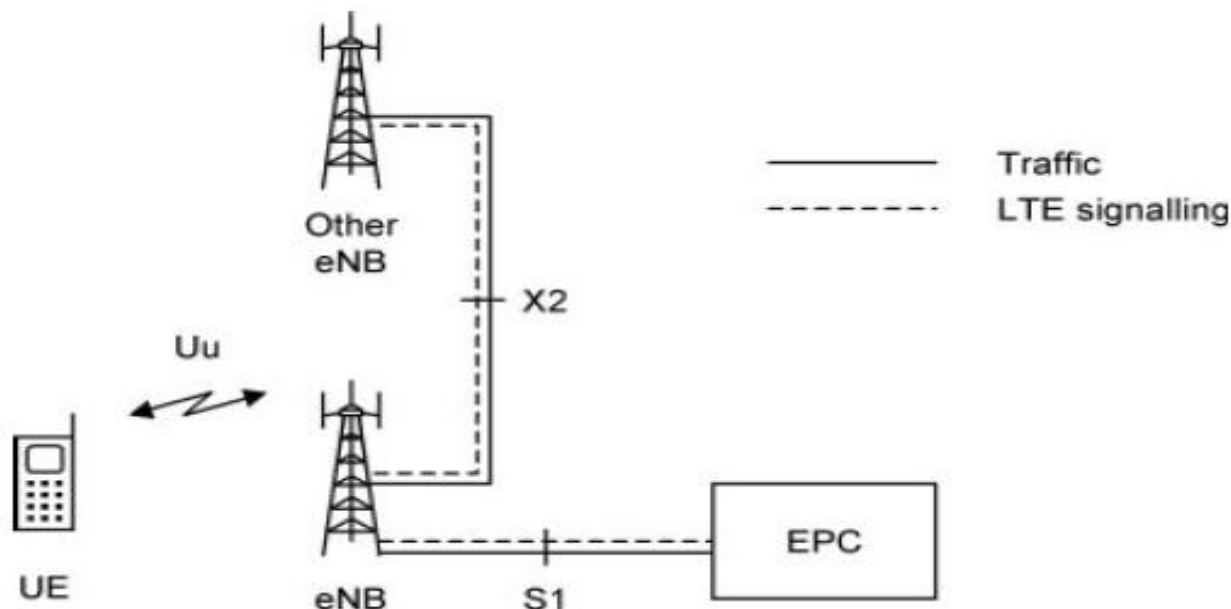
2.4.3 Αρχιτεκτονική του δικτύου ασύρματης πρόσβασης (E-UTRAN)

Το E-UTRAN (Evolved – Universal Terrestrial Radio Access Network) είναι υπεύθυνο για την ασύρματη σύνδεση και επικοινωνία του εξοπλισμού του χρήστη με το δίκτυο κορμού EPC καθώς και για τη διασφάλιση της αξιόπιστης μετάδοσης των δεδομένων και των μηνυμάτων ελέγχου και σηματοδοσίας.

Είναι ένα πρότυπο που ορίζει το δίκτυο ασύρματης πρόσβασης (Radio Access Network - RAN), περιγράφει τις προδιαγραφές και τις απαιτήσεις που διέπουν τη διεπαφή αέρα και αντικαθιστά τις τεχνολογίες UMTS, HSDPA / HSUPA που καθορίζονται από τις εκδόσεις 5 και μετέπειτα.

Το E-UTRAN αν και αποτελεί την αναβάθμιση του UTRAN του UMTS σχεδιάστηκε από την αρχή ως νέα διεπαφή αέρα και δεν σχετίζεται με το WCDMA. Η νέα διεπαφή αέρα και το εξελιγμένο δίκτυο πρόσβασης ικανοποιούν πλήρως τις

απαιτήσεις του 3GPP επιτυγχάνοντας τους αναμενόμενους ρυθμούς μετάδοσης, τη βέλτιστη μεταφορά πακέτων δεδομένων και την αποτελεσματικότερη και ορθότερη διαχείριση των πόρων. Στο σχήμα 2.5 απεικονίζεται η αρχιτεκτονική του δικτύου πρόσβασης E-UTRAN.



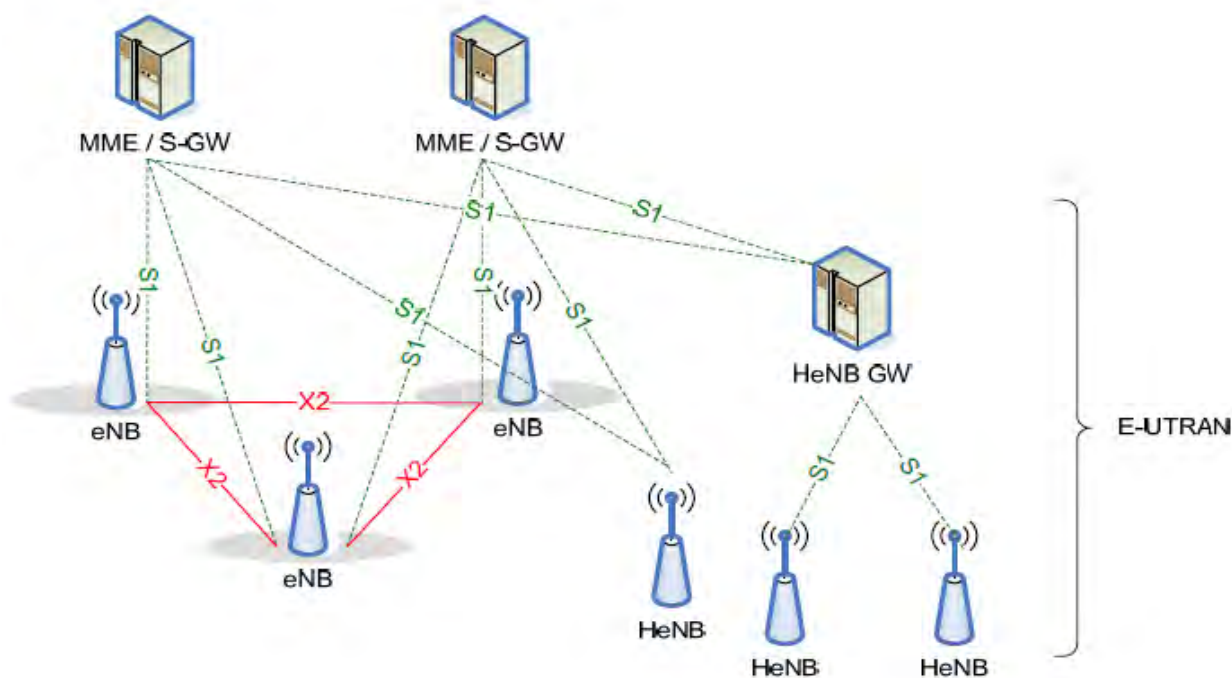
Σχήμα 2.5: Αρχιτεκτονική του E-UTRAN

Το LTE ορίζει μία επίπεδη αρχιτεκτονική με την υποστήριξη ενός μόνο κόμβου στο E-UTRAN, τον εξελεγμένο σταθμό βάσης **eNodeB** (evolved NodeB). Το δίκτυο ασύρματης πρόσβασης αποτελείται από ένα σύνολο σταθμών βάσης eNodeBs καταναμεμένων σε ολόκληρη την γεωγραφική περιοχή του δικτύου με τέτοιο τρόπο ώστε να ικανοποιούνται πλήρως οι ανάγκες της κάλυψης και της χωρητικότητας.

Κάθε σταθμός βάσης είναι υπεύθυνος για την επικοινωνία και τον έλεγχο ενός συνόλου φορητών συσκευών σε μία ή περισσότερες κυψέλες του δικτύου. Σε αντίθεση με το UMTS το LTE δεν υποστηρίζει τη δυνατότητα της soft μεταγωγής. Αυτό οφείλεται στο γεγονός ότι μία συσκευή επικοινωνεί μόνο με έναν σταθμό βάσης και ένα κύτταρο κάθε χρονική στιγμή. Ο σταθμός βάσης που εξυπηρετεί τον εξοπλισμό του χρήστη ονομάζεται **serving eNodeB**. Οι βασικές λειτουργίες ενός σταθμού βάσης συνοψίζονται στη λήψη και την αποστολή των δεδομένων από και προς το συνδρομητή και στον έλεγχο των φορητών συσκευών μέσω της ανταλλαγής μηνυμάτων σηματοδοσίας πάνω από τη διεπαφή αέρα.

Το πρότυπο του E-UTRAN υποστηρίζει την ύπαρξη εκτός των eNodeB του δικτύου και ιδιόκτητων σταθμών βάσης γνωστά ως Home eNodeBs (**HeNB**). Ο HeNB είναι ένας σταθμός βάσης ο οποίος έχει αγοραστεί από τον χρήστη και παρέχει κάλυψη στον προσωπικό του χώρο, για παράδειγμα στην οικεία του. Ένας ιδιόκτητος σταθμός βάσης ανήκει σε μία κλειστή ομάδα συνδρομητών και εξυπηρετεί μόνο

συσκευές οι οποίες ανήκουν σε αυτή. Ο HeNB μπορεί να συνδεθεί άμεσα με το δίκτυο κορμού EPC μέσω της διεπαφής S1 όπως ο κανονικός σταθμός βάσης ή έμμεσα μέσω μίας πύλης που ονομάζεται HeNB Gateway (**HeNB GW**). Σε μία πύλη HeNB GW συνδέονται αρκετοί HeNBs ωστόσο το πρότυπο δεν υποστηρίζει την μεταξύ τους επικοινωνία.

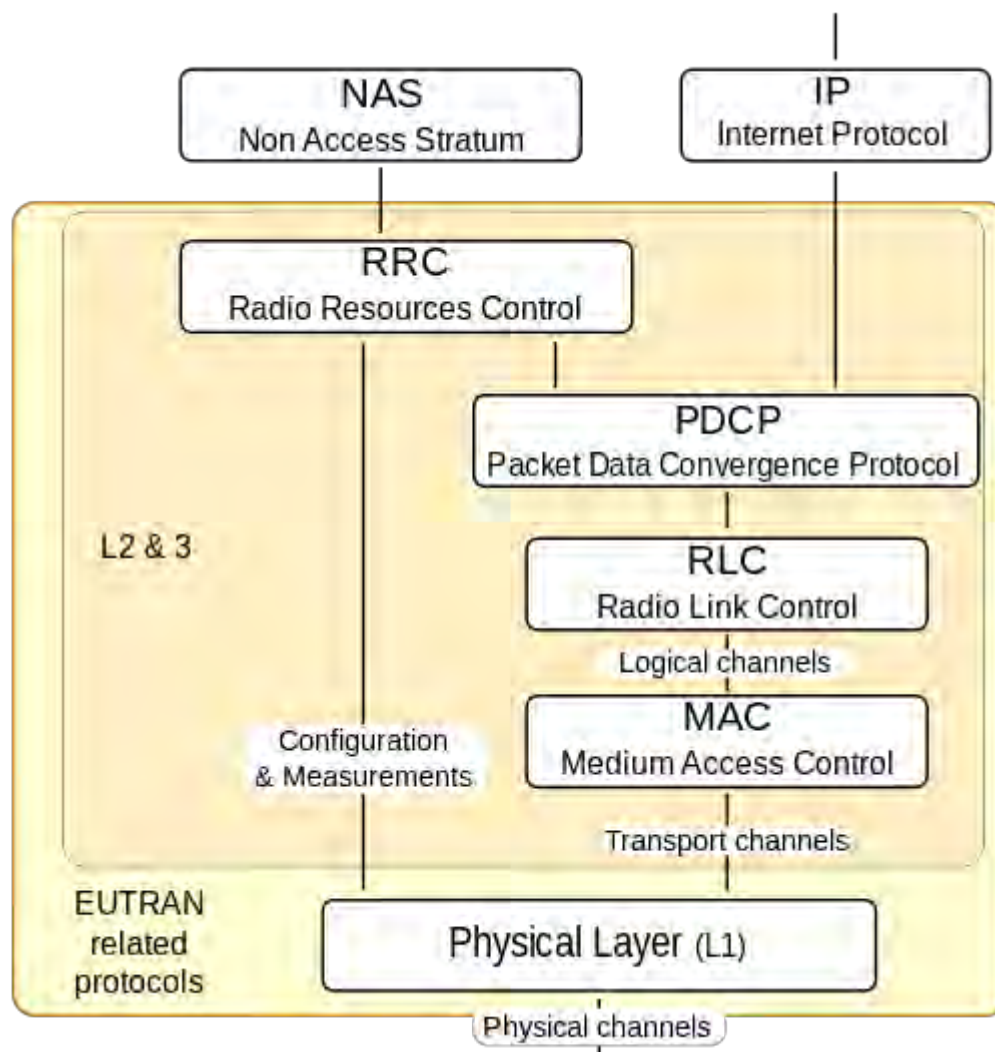


Σχήμα 2.6: Διασύνδεση ανάμεσα στο σταθμό βάσης HeNB και το EPC.

Κάθε σταθμός βάσης eNodeB συνδέεται με τον εξοπλισμό του χρήστη μέσω της διεπαφής αέρα **LTE – Uu** και με το δίκτυο κορμού EPC μέσω της διεπαφής **S1**. Οι eNodeB διασυνδέονται μεταξύ τους μέσω της διεπαφής **X2**.

2.4.3.1 Πρωτόκολλα επικοινωνίας του E-UTRAN

Τα πρωτόκολλα επικοινωνίας του E-UTRAN χρησιμοποιούνται για την σύνδεση και την ανταλλαγή δεδομένων και σηματοδότησης ανάμεσα στον εξοπλισμό του χρήστη και το δίκτυο ασύρματης πρόσβασης μέσω της διεπαφής αέρα. Η αρχιτεκτονική τους απεικονίζεται στο σχήμα 2.7.



Σχήμα 2.7: Αρχιτεκτονική των πρωτοκόλλων επικοινωνίας του E-UTRAN.

Η διαστρωμάτωσή τους περιλαμβάνει τα κάτωθι επίπεδα:

- Physical (**PHY**) layer
- Medium Access Control (**MAC**) layer
- Radio Link Control (**RLC**) layer
- Packet Data Convergence Protocol (**PDCP**) layer
- Radio Resource Control (**RRC**) layer

Κάθε πρωτόκολλο εκτελεί συγκεκριμένες λειτουργίες βάση της θέσης του στην ιεραρχία και παρέχει τις υπηρεσίες του στο αμέσως υψηλότερο επίπεδο.

Physical layer: το φυσικό επίπεδο είναι υπεύθυνο για τη μετάδοση όλων των δεδομένων πάνω από τη διεπαφή αέρα. Παρέχει λειτουργίες όπως η προσαρμογή των παραμέτρων της ασύρματης ζεύξης (link adaptation), ο έλεγχος ισχύος (power control), η επιλογή κυψέλης (cell search), η εκτέλεση μεταγωγής, η παροχή σημαντικών μετρήσεων στο επίπεδο ελέγχου και διαχείρισης πόρων (RRC). Επικοινωνεί με το επίπεδο MAC μέσω καναλιών μεταφοράς.

MAC layer: είναι υπεύθυνο για την προσπέλαση του μέσου. Στις λειτουργίες του περιλαμβάνονται ο δυναμικός προγραμματισμός των πόρων των συσκευών, η τεχνολογία HARQ για τη διόρθωση λαθών των λαμβανόμενων πακέτων, η ιεράρχηση των λογικών καναλιών, η πολύπλεξη / απόπλεξη τους ως προς τη μετάδοση των δεδομένων τους κ.α.. Το επίπεδο MAC αλληλεπιδρά με το φυσικό επίπεδο μέσω των καναλιών μεταφοράς και με το RLC μέσω των λογικών καναλιών.

RLC layer: είναι υπεύθυνο για τον έλεγχο της ασύρματης ζεύξης. Περιλαμβάνει λειτουργίες όπως ο κατακερματισμός, η σύνένωση, η επαναδιάταξη, η διπλή ανίχνευση και η παράδοση με σωστή σειρά των RLC PDUs. Υποστηρίζει τη δυνατότητα τριών τρόπων λειτουργίας ανάλογα με το επιθυμητό επίπεδο αξιοπιστίας της μετάδοσης, Transparent Mode (TM), Unacknowledged Mode (UM) και Acknowledged Mode (AM). Το RLC λαμβάνει πακέτα από επίπεδο PDCP (PDCP PDUs) και προωθεί RLC PDUs στο επίπεδο MAC.

PDCP layer: παρέχει υπηρεσίες στα ιεραρχικά υψηλότερα επίπεδα IP και RRC. Ως προς το RRC εξασφαλίζει την ασφαλή μεταφορά των μηνυμάτων ελέγχου και σηματοδότησης μέσω των λειτουργιών της κρυπτογράφησης (ciphering) και της επιβεβαίωσης ακεραιότητας (integrity verification). Για το επίπεδο IP αναλαμβάνει τη μεταφορά των IP πακέτων του χρήστη χρησιμοποιώντας τεχνικές συμπίεσης / αποσυμπίεσης κεφαλίδας (ROHC compression/decompression) και κρυπτογράφησης.

RRC layer: είναι υπεύθυνο για την ανταλλαγή όλων των μηνυμάτων ελέγχου και σηματοδότησης ανάμεσα στη συσκευή του χρήστη και το σταθμό βάσης eNodeB πάνω από τη διεπαφή αέρα. Ανήκει στην ομάδα πρωτοκόλλων υπό τον Access Stratum (AS) του επιπέδου ελέγχου (control plane) και παρέχει λειτουργίες όπως η μετάδοση πληροφοριών συστήματος, η εγκαθίδρυση, εποπτεία και απεγκατάσταση RRC συνδέσεων, η μεταφορά μηνυμάτων NAS (Non Access Stratum), η διαχείριση της κινητικότητας της συσκευής.

Το Φυσικό επίπεδο ονομάζεται και L1 επίπεδο (layer 1), τα πρωτόκολλα MAC, RLC και PDCP συνθέτουν το L2 επίπεδο (layer 2) ενώ το RRC χαρακτηρίζεται ως L3 επίπεδο (layer 3).

Η αρχιτεκτονική πρωτοκόλλων του E-UTRAN αλληλεπιδρά με το πρωτόκολλο NAS σε επίπεδο ελέγχου (control plane) και με το πρωτόκολλο IP σε επίπεδο χρήστη (user plane) για τη προώθηση των δεδομένων.

2.4.3.2 Λειτουργίες του E-UTRAN

Το E-UTRAN είναι επιφορτισμένο με όλες τις λειτουργίες που σχετίζονται με ασύρματο τμήμα του δικτύου. Οι πιο βασικές είναι οι εξής:

1. Μεταφορά των δεδομένων του χρήστη

Διασφάλιση της έγκυρης και έγκαιρης μετάδοσης των user data ανάμεσα στο χρήστη και το δίκτυο κορμού μέσω των διεπαφών Uu και S1 αντίστοιχα.

2. Υψηλή φασματική απόδοση

Αποδοτική διαχείριση των πόρων για βέλτιστη λειτουργία και παροχή υψηλής ποιότητας εξυπηρέτησης.

3. Ασφάλεια και προστασία της ακεραιότητας της πληροφορίας

Διασφάλιση ισχυρής προστασίας των προσωπικών δεδομένων από μη εξουσιοδοτημένη παρέμβαση τρίτων.

4. Συμπίεση κεφαλίδας (Header Compression)

Η τεχνική του Header compression συνεισφέρει σε σημαντικό βαθμό στην αποφυγή καταστάσεων υπερφόρτωσης (overhead) του δικτύου λόγω των επιπρόσθετων πληροφοριών (Headers) που προστίθενται στα δεδομένα από το κάθε επίπεδο της αρχιτεκτονικής των πρωτοκόλλων του E-UTRAN.

5. Εγκαθίδρυση, εποπτεία και τερματισμός συνδέσεων

Το E-UTRAN επιτελεί όλες τις απαραίτητες RRC διεργασίες για την εγκατάσταση, τη διαχείριση και την απελευθέρωση των συνδέσεων από το ένα άκρο του δικτύου στο άλλο.

6. Εξισορρόπηση τηλεπικοινωνιακού φορτίου

Με τον όρο εξισορρόπηση φορτίου αναφερόμαστε στη διαχείριση της άνισης κατανομής της τηλεπικοινωνιακής κίνησης που προκύπτει σε πολλά κύτταρα του δικτύου εξαιτίας του μεταβαλλόμενου συνδρομητικού προφίλ. Το E-UTRAN φροντίζει για την κατανομή του φορτίου με τέτοιο τρόπο ώστε να επιτυγχάνεται διαρκώς η βέλτιστη αξιοποίηση των περιορισμένων πόρων, υψηλό QoS στις παρεχόμενες υπηρεσίες και να διατηρείται σε χαμηλά επίπεδα η πιθανότητα μη εξυπηρέτησης των συνδρομητών σε περιόδους αιχμής του δικτύου.

7. Ρύθμιση και προστασία από παρεμβολές γειτονικών κυττάρων

Η κατανομή των πόρων και η διαχείρισή τους πρέπει να επιτυγχάνεται με τέτοιο τρόπο ώστε να διατηρούνται οι παρεμβολές γειτονικών κυττάρων σε χαμηλό επίπεδο, να διασφαλίζεται η αξιοπιστία στην επικοινωνία ακόμα και στα όρια των κυψελών και να μην επηρεάζεται αρνητικά η απόδοση του συστήματος.

8. Multimedia Broadcast and Multicast Services (MBMS)

Ως MBMS ορίζουμε την point to multipoint υπηρεσία για τη μετάδοση πληροφοριών από μία πηγή προς πολλαπλούς προορισμούς του δικτύου πρόσβασης. Το E-UTRAN υποστηρίζει την παροχή broadcast και multicast υπηρεσιών όπου η ίδια πληροφορία αποστέλλεται σε πολλαπλούς χρήστες του δικτύου επιτρέποντας τον διαμοιρασμό των πόρων.

Όλες οι προαναφερθείσες λειτουργίες ανήκουν και επιτελούνται από τον εξελεγμένο σταθμό βάσης του LTE τον eNodeB. Σε αντίθεση με το δίκτυο πρόσβασης του UMTS, στην υποδομή του E-UTRAN ο ελεγκτής ασύρματου δικτύου RNC (Radio Network Control) δεν υφίσταται ως αυτόνομος κόμβος αλλά ενσωματώνεται στον eNodeB. Έτσι οι λειτουργίες του σταθμού βάσης NodeB του UMTS μαζί με τον RNC υλοποιούν τον εξελεγμένο σταθμό βάσης του LTE, τον eNodeB. Τα οφέλη από τη συγχώνευση αυτή είναι η ελαχιστοποίηση των καθυστερήσεων από την ανταλλαγή επιπρόσθετων μηνυμάτων σηματοδότησης που λάμβανε χώρα ανάμεσα στους κόμβους NodeB και RNC καθώς και η κατανομή του φορτίου των εργασιών του RNC σε έναν αριθμό από eNodeBs.

2.4.4 Αρχιτεκτονική του δικτύου κορμού EPC

Η αρχιτεκτονική του EPC βασίζεται εξ' ολοκλήρου στην IP επικοινωνία και στην αποκλειστική χρήση της μεταγωγής πακέτων για όλους τους τύπους δεδομένων. Το δίκτυο κορμού είναι υπεύθυνο για το συνολικό έλεγχο του εξοπλισμού του χρήστη και την εγκατάσταση των φορέων (bearers) για τη μετάδοση των πακέτων.

Οι βασικοί κόμβοι που απαρτίζουν το EPC είναι οι εξής:

- Πύλη δικτύου δεδομένων (PDN-GW Packet Data Network Gateway)
- Πύλη εξυπηρέτησης (S-GW Serving Gateway)
- Φορέας διαχείρισης κινητικότητας (MME Mobility Management Entity)

Packet Data Network Gateway (PDN-GW)

Ο κόμβος PDN-GW αναλαμβάνει τη διασύνδεση ανάμεσα στον εξοπλισμό του χρήστη και τα εξωτερικά δίκτυα πακέτων δεδομένων όπως για παράδειγμα το Διαδίκτυο, το υποσύστημα IMS, τους servers του δικτύου κ.α.. Ουσιαστικά αποτελεί τον εξωτερικό δρομολογητή (router) του δικτύου. Εσωτερικά του EPC επικοινωνεί με την πύλη εξυπηρέτησης S-GW μέσω της διεπαφής S5/S8 και εξωτερικά με τα

δίκτυα πακέτων PDNs μέσω της διεπαφής **SGi**. Ως προς την κατερχόμενη ζεύξη δέχεται τα πακέτα δεδομένων από το PDN και εν συνεχεία εκτελώντας τις απαραίτητες ενέργειες τα προωθεί στο σωστό S-GW που εξυπηρετεί το συνδρομητή. Ως προς την ανερχόμενη ζεύξη λαμβάνει τα πακέτα που αποστέλλονται από το χρήστη μέσω του S-GW και τα δρομολογεί στο κατάλληλο PDN.

Μία πύλη PDN-GW μπορεί να συνδέεται με ένα ή περισσότερα S-GWs και PDNs ανάλογα με τις εκάστοτε επικοινωνιακές απαιτήσεις και ανάγκες του συνδρομητή και κάθε UE με τη σειρά της μπορεί να επικοινωνεί με περισσότερους του ενός κόμβους PDN-GWs. Ωστόσο μία συσκευή που σχετίζεται με ένα συγκεκριμένο PDN-GW εξυπηρετείται μόνο από ένα S-GW.

Για να επιτευχθεί η σύνδεση και η μεταφορά πακέτων από και προς ένα PDN ο κόμβος PDN-GW εκχωρεί μία IP διεύθυνση στον εξοπλισμό του χρήστη. Κάθε συσκευή από τη χρονική στιγμή της ενεργοποίησής της ανατίθεται σε μία προεπιλεγμένη πύλη PDN-GW και σε ένα προκαθορισμένο δίκτυο πακέτων δεδομένων για την παροχή συνεχούς IP συνδεσιμότητας. Μετά τη φάση της ενεργοποίησης ο χρήστης έχει τη δυνατότητα να συνδεθεί ταυτόχρονα σε περισσότερες από μία πύλες PDN-GWs για την προσπέλαση πολλαπλών PDNs.

Επιπρόσθετα ο κόμβος PDN-GW είναι υπεύθυνος για τη διάκριση και την κατηγοριοποίηση των διαφορετικών ροών πληροφορίας με βάση την ποιότητα εξυπηρέτησης (QoS) της κάθε υπηρεσίας και την αντιστοίχιση τους στους κατάλληλους φορείς (bearers) για τη μετάδοση των πακέτων.

Το PDN-GW παρακολουθεί την τηλεπικοινωνιακή κίνηση του κάθε συνδρομητή, συλλέγει πληροφορίες χρέωσης και αλληλεπιδρά με τον κόμβο PCRF (Policy and Charging Function) αναφορικά με την τιμολόγηση των υπηρεσιών στις οποίες είναι εγγεγραμμένος ο χρήστης.

Τέλος λειτουργεί ως κόμβος υποστήριξης για τη διαχείριση της κινητικότητας του χρήστη ανάμεσα στις 3GPP και non 3GPP τεχνολογίες όπως το cdma2000 και WiMAX.

Serving Gateway (S-GW)

Η πύλη S-GW αποτελεί έναν δρομολογητή υψηλού επιπέδου. Η βασική του λειτουργία είναι η προώθηση των πακέτων του χρήστη ανάμεσα στο σταθμό βάσης eNodeB και τον κόμβο PDN-GW μέσω των διεπαφών **S1-U** και **S5/S8** αντίστοιχα. Όταν η συσκευή είναι συνδεδεμένη στο δίκτυο (**connected state**) ο κόμβος S-GW στην περίπτωση της κατερχόμενης ζεύξης δρομολογεί τα δεδομένα από το PDN-GW στο σταθμό βάσης που εξυπηρετεί το συνδρομητή. Στην ανερχόμενη ζεύξη λαμβάνει τα πακέτα από τον eNodeB και τα προωθεί στη σωστή πύλη PDN-GW. Σε κατάσταση αδράνειας της συσκευής (**idle state**) δεν υφίσταται ο διάυλος

επικοινωνίας με το δίκτυο πρόσβασης καθώς δεν έχουν δεσμευτεί πόροι για την αποκατάσταση της σύνδεσης. Στην προκειμένη περίπτωση η πύλη S-GW αναλαμβάνει την προσωρινή αποθήκευση των δεδομένων που προορίζονται για το ανενεργό χρήστη και επικοινωνεί με τον κόμβο MME για την αποστολή κατάλληλου μηνύματος ειδοποίησης (paging) προς αυτόν. Μόλις η συσκευή ειδοποιηθεί, αν επιθυμεί να λάβει τα δεδομένα της την συγκεκριμένη χρονική στιγμή συνδέεται στο δίκτυο και εξυπηρετείται από το S-GW.

Σημαντική είναι η συμβολή του κόμβου S-GW στην περίπτωση της μεταγωγής. Όταν κριθεί επιβεβλημένη η αλλαγή σταθμού βάσης (inter eNodeB handover) για τη συσκευή, η πύλη S-GW καθοδηγούμενη από τον κόμβο MME μέσω εντολών ελέγχου προβαίνει στην ομαλή εκτροπή της ροής των πακέτων δεδομένων από τον παλιό eNodeB στον νέο διασφαλίζοντας την αδιάλειπτη παροχή υπηρεσιών. Επιπλέον ο S-GW αναλαμβάνει τη διαχείριση της κινητικότητας του συνδρομητή ανάμεσα στο LTE και στα 3GPP δίκτυα όπως το GPRS και το UMTS.

Όσον αφορά τις λειτουργίες ελέγχου η πύλη εξυπηρέτησης διαδραματίζει δευτερεύοντα ρόλο. Περιορίζεται μόνο στην αξιοποίηση και την κατανομή των πόρων που διαθέτει και παρακολουθεί την δραστηριότητα του χρήστη για τη συλλογή πληροφοριών χρέωσης σύμφωνα με τις υποδείξεις που λαμβάνει από τον κόμβο PCRF.

Με βάση την αρχιτεκτονική του EPC δύναται να έχουμε έναν ικανοποιητικό αριθμό από πύλες εξυπηρέτησης κατανεμημένες σε ολόκληρη την γεωγραφική περιοχή του δικτύου. Κάθε κόμβος S-GW εξυπηρετεί έναν σύνολο συσκευών και ονομάζεται **serving S-GW** για την κάθε μία από αυτές. Το σενάριο αλλαγής σταθμού εξυπηρέτησης S-GW είναι εφικτό όταν ο συνδρομητής μετακινείται καλύπτοντας μεγάλες αποστάσεις.

Οι πύλες PDN-GW και S-GW από κοινού αναφέρονται και ως **SAE-GW**.

Mobility Management Entity (MME)

Ο φορέας διαχείρισης κινητικότητας MME είναι αποκλειστικά κόμβος ελέγχου του δικτύου και υπεύθυνος για το συντονισμό των υπόλοιπων οντοτήτων μέσω της αποστολής εντολών ελέγχου και της ανταλλαγής μηνυμάτων σηματοδότησης. Ο MME δεν συμμετέχει καθόλου ως ενδιάμεσος κόμβος στην πορεία μετάδοσης των πακέτων δεδομένων του χρήστη παρά μόνο ελέγχει όλες τις διεργασίες αναφορικά με αυτήν και τη διαχείριση της σύνδεσης της συσκευής στο δίκτυο κορμού.

Οι κύριες λειτουργίες που επιτελεί είναι οι κάτωθι:

1. Διαχείριση των φορέων μετάδοσης πακέτων (Bearer management)

Ο κόμβος MME επιτηρεί και συντονίζει τις διαδικασίες αναφορικά με την διαχείριση (εγκαθίδρυση / απελευθέρωση) των διαύλων επικοινωνίας (bearers) μέσω της αποστολής εντολών ελέγχου στους αρμόδιους κόμβους S-GW, PDN-GW και eNodeB. Οι προαναφερθέντες κόμβοι καθοδηγούμενοι από το MME αναλαμβάνουν την δημιουργία ενός IP αγωγού (EPS bearer) για τη διασύνδεση του χρήστη με το δίκτυο πακέτων δεδομένων PDN. Στην περίπτωση που η συσκευή τίθεται σε αδράνεια οι δεσμευμένοι πόροι επικοινωνίας με το EPC απελευθερώνονται πάντα υπό με τις οδηγίες του κόμβου MME.

2. Ασφάλεια και πιστοποίηση (Security and Authentication)

Η ασφάλεια των δεδομένων του χρήστη και των πληροφοριών ελέγχου είναι λειτουργία άμεσα συνυφασμένη με το MME. Όταν μία κινητή συσκευή αιτηθεί σύνδεση στο δίκτυο εκκινείται μία διαδικασία αμοιβαίας πιστοποίησης τόσο της συσκευής όσο και του ίδιου του δικτύου. Ο κόμβος MME επικοινωνεί με τη βάση δεδομένων HSS και λαμβάνει πληροφορίες για την εξακρίβωση της ταυτότητας της συσκευής. Μέσα από τη διαδικασία της πιστοποίησης του χρήστη καθορίζονται τα κλειδιά ασφαλείας που θα χρησιμοποιηθούν για την κρυπτογράφηση των φορέων επικοινωνίας και όλων των δεδομένων που διακινούνται μέσω της διεπαφής αέρα.

3. Non Access Stratum (NAS) mobility management

Μία αδρανής συσκευή μπορεί να μετακινείται ελεύθερα στο δίκτυο. Στο πλαίσιο της ορθής διαχείρισης των πόρων, της ενεργειακής απόδοσης και της ελαχιστοποίησης της σηματοδότησης οι ασύρματοι φορείς (radio bearers) ανάμεσα στη συσκευή και στο σταθμό βάσης απελευθερώνονται και η επικοινωνία με το δίκτυο είναι περιορισμένη. Για να είναι σε θέση το δίκτυο να επικοινωνήσει με το UE όταν καταστεί ανάγκη, ο εξοπλισμός του χρήστη αποστέλλει ενημερώσεις αναφορικά με τη νέα περιοχή παρακολούθησης (Tracking area) στην οποία ευρίσκεται. Η διαδικασία αυτή ονομάζεται Tracking Area Update. Ο κόμβος MME από τη μεριά του είναι υπεύθυνος να ενημερώνει τον κατάλογο με όλες τις περιοχές παρακολούθησης (TAs) και να γνωρίζει σε ποια Tracking Area ευρίσκεται η συσκευή. Σε περίπτωση που υπάρχουν downlink δεδομένα για το χρήστη ο MME στέλνει ένα μήνυμα paging προς όλους του σταθμούς βάσης eNodeBs που ανήκουν στην ίδια περιοχής παρακολούθησης για να ενημερώσουν την συγκεκριμένη συσκευή.

4. Υποστήριξη μεταγωγής (Inter eNodeB handover)

Στην περίπτωση όπου κρίνεται επιβεβλημένη η αλλαγή σταθμού βάσης της φορητής συσκευής οι δύο εμπλεκόμενοι σταθμοί, ο source eNodeB και ο target eNodeB ανταλλάσσουν πληροφορίες ελέγχου διαμέσου του MME.

5.Υποστήριξη διαλειτουργικότητας με άλλα 3GPP δίκτυα (Interworking support)

Ο κόμβος MME επικοινωνεί με άλλα 3GPP δίκτυα πρόσβασης με σκοπό την συνεχή συνδεσιμότητα της συσκευής στην περίπτωση που ο συνδρομητής τεθεί εκτός κάλυψης του δικτύου LTE να εξυπηρετηθεί από άλλα δίκτυα όπως το GSM, το GPRS ή το UMTS.

Ο αριθμός των κόμβων MME ενός δικτύου είναι συγκριτικά μικρότερος του αντίστοιχου των SAE-GWs. Μία συσκευή συνδέεται με ένα MME το οποίο ονομάζεται **serving MME**. Μεταγωγή μεταξύ MMEs υποστηρίζεται σε περιπτώσεις όπου ο συνδρομητής κινείται σε αρκετά μεγάλη περιοχή του δικτύου.

Στην υποδομή του δικτύου κορμού EPC μεταξύ άλλων περιλαμβάνονται και οι ακόλουθοι κόμβοι:

Home Subscription Server (HSS)

Ο κόμβος HSS είναι η βάση δεδομένων όπου είναι μόνιμα αποθηκευμένα προσωπικά δεδομένα του κάθε συνδρομητή του δικτύου. Τέτοιου είδους δεδομένα είναι ο αριθμός τηλεφώνου, η ταυτότητα IMSI, πληροφορίες πιστοποίησης για την εξακρίβωση του χρήστη και την δημιουργία κλειδιών κρυπτογράφησης κ.α..

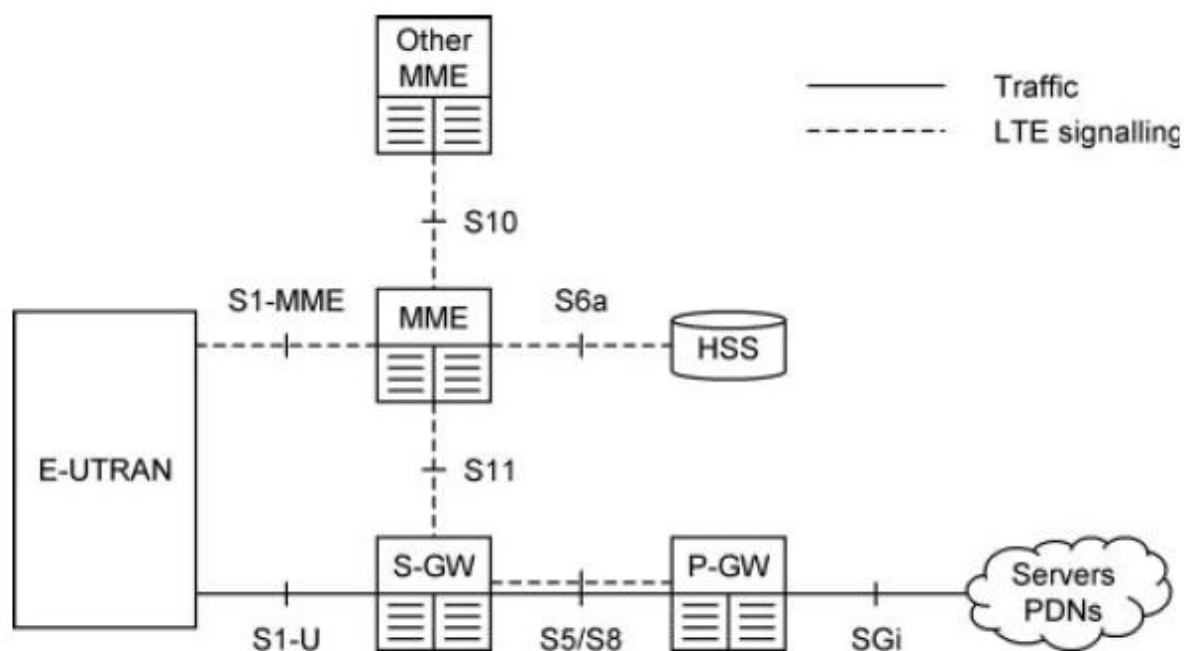
Policy and Charging Resource Function (PCRF)

Ο κόμβος PCRF είναι υπεύθυνος για τη λήψη αποφάσεων αναφορικά με τη διαχείριση των παρεχόμενων υπηρεσιών υπό το πρίσμα του παράγοντα QoS. Αλληλεπιδρά κυρίως με την πύλη PDN-GW, και με την S-GW αν κριθεί απαραίτητο, μεταβιβάζοντας πληροφορίες με σκοπό την εγκαθίδρυση των κατάλληλων φορέων μετάδοσης για δεδομένη ποιότητα εξυπηρέτησης QoS και υποδεικνύοντας τους τρόπους τιμολόγησης των υπηρεσιών στις οποίες είναι εγγεγραμμένος ο συνδρομητής.

Services domain

Το services domain περιλαμβάνει διάφορα υποσυστήματα τα οποία παρέχουν συγκεκριμένες λειτουργίες και χαρακτηρίζονται από τη δική τους εσωτερική αρχιτεκτονική. Ένα από τα υποσυστήματα αυτά είναι το IMS (IP Multimedia Subsystem) το οποίο αναλαμβάνει την υποστήριξη των υπηρεσιών φωνής στο LTE μέσω της τεχνολογίας VoIP.

Το σχήμα 2.8 απεικονίζει την αρχιτεκτονική του δικτύου κορμού EPC. Διακρίνονται οι βασικοί κόμβοι, οι διεπαφές διασύνδεσής τους καθώς και η ροή των δεδομένων του χρήστη και της σηματοδότησης ανάμεσα στα στοιχεία του δικτύου.



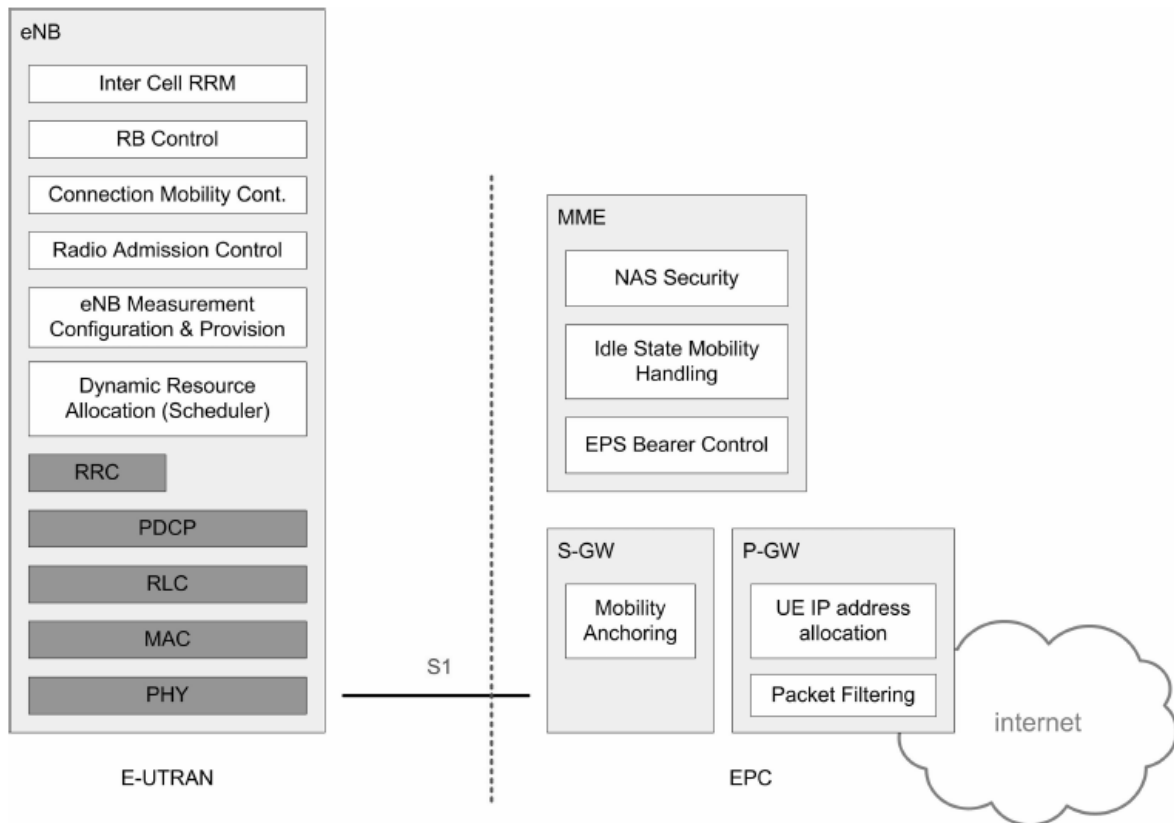
Σχήμα 2.8: Αρχιτεκτονική του EPC

Έχοντας αναλύσει την υποδομή των δικτύων πρόσβασης E-UTRAN και κορμού EPC καταλήγουμε στο συμπέρασμα ότι η συνολική αρχιτεκτονική του EPS είναι σε σημαντικό βαθμό απλούστερη συγκριτικά με την αντίστοιχη του προκατόχου του, UMTS. Εξάλλου η απαίτηση αυτή είχε διατυπωθεί ρητά ως μία από τις βασικές προδιαγραφές του νέου προτύπου. Η υπεροχή αυτή οφείλεται αφενός μεν στην παντελή απουσία της μεταγωγής κυκλώματος και αφετέρου στον μικρότερο αριθμό των λειτουργικών μονάδων που συνθέτουν την καινούρια υποδομή.

Με το νέο πρότυπο καθιερώνονται μόνο δύο τύποι κόμβων, ο σταθμός βάσης eNodeB και οι πύλες S-GW, PDN-GW για τη μετάδοση των δεδομένων του συνδρομητή έναντι τεσσάρων (NodeB, RNC, SGSN, GGSN) που διαθέτει το UMTS. Η μείωση αυτή συντελέστηκε μέσα από καινοτόμες σχεδιαστικές λύσεις. Αρχικά ο κόμβος PDN-GW αντιστοιχεί στον παλιό GGSN. Ωστόσο ο εξελιγμένος σταθμός βάσης eNodeB ενσωματώνει τον παλιό NodeB μαζί με τον ελεγκτή RNC. Η ενσωμάτωση αυτή επέφερε μείωση της καθυστέρησης στη μετάδοση των δεδομένων και βελτίωση της απόδοσης λειτουργίας του δικτύου.

Επιπροσθέτως ο κόμβος SGSN του UMTS διαχωρίστηκε σε δύο νέους κόμβους, την πύλη S-GW και το MME, με τον καθένα να επιτελεί διακριτές λειτουργίες. Ο κόμβος S-GW δρομολογεί την τηλεπικοινωνιακή κίνηση του συνδρομητή σε επίπεδο χρήστη (user plane) ενώ ο MME διαχειρίζεται όλα τα σήματα ελέγχου και σηματοδοσίας. Η ύπαρξη αυτόνομου κόμβου MME αποκλειστικά για την παροχή λειτουργιών ελέγχου έχει ως αποτελέσματα την ευκολότερη διαχείριση, αναβάθμιση και επέκταση του δικτύου. Οι διαχειριστές πλέον έχουν τη δυνατότητα ανεξάρτητου χειρισμού των παραμέτρων της χωρητικότητας και της σηματοδοσίας επιλέγοντας τις κατάλληλες

τροποποιήσεις της δικτυακής υποδομής ανάλογα με την εκάστοτε περίπτωση μεταβολής τους. Στο σχήμα που ακολουθεί παρουσιάζεται συνοπτικά η λειτουργική διάκριση ανάμεσα στο E-UTRAN και το EPC.



Σχήμα 2.9: Λειτουργική διάκριση ανάμεσα στο E-UTRAN και στο EPC.

2.4.4.1 Χαρακτηριστικά του EPC

Τα χαρακτηριστικά του EPC είναι τα εξής:

1. IP επικοινωνία

Το δίκτυο κορμού EPC εξασφαλίζει την αδιάλειπτη IP συνδεσιμότητα ανάμεσα στον εξοπλισμό του χρήστη και τα δίκτυα πακέτων δεδομένων PDNs. Με την ενεργοποίηση της η συσκευή λαμβάνει μία μόνιμη IP διεύθυνση, συνδέεται σε μία προκαθορισμένη πύλη PDN-GW και σε ένα προεπιλεγμένο δίκτυο πακέτων PDN. Η διεύθυνση της συσκευής διατηρείται μέχρι την αποσύνδεση της από το δίκτυο. Το EPC υποστηρίζει διευθυνσιοδότηση IPv4, IPv6 και dual stack IPv4/IPv6.

2. Συμπεριφορά Διαδικτύου

Σκοπός του νέου δικτύου κορμού είναι η αξιόπιστη μετάδοση των πακέτων δεδομένων από και προς το χρήστη. Ουσιαστικά το EPC μέσω των φορέων προώθησης (EPS bearers) λειτουργεί ως ένας end to end αγωγός μεταφοράς ο οποίος όμως δεν σχετίζεται ούτε με το περιεχόμενο των μεταφερόμενων πληροφοριών ούτε με την εφαρμογή που τις παράγει. Το EPC αναπτύχθηκε με βάση τον τρόπο και τη φιλοσοφία λειτουργίας του Διαδικτύου, μιμούμενο τη συμπεριφορά του, εν αντιθέση με τα προγενέστερα δίκτυα κινητών επικοινωνιών.

3. Αξιοπιστία μετάδοσης

Το EPC διαθέτει μηχανισμούς διαχείρισης λαθών όπως τεχνικές διόρθωσης (FEC), επιβεβαίωσης ορθής λήψης (HARQ), αναμετάδοσης πακέτων, τεχνικές εκτίμησης των συνθηκών του ασύρματου μέσου (channel estimation), μεθόδους προσαρμογής της σύνδεσης (link adaptation) και των παραμέτρων μετάδοσης (adaptive modulation and coding schemes - MCS) καθώς και τεχνικές χρήσης πολλαπλών κεραιών. Στόχος όλων αυτών των τεχνολογιών είναι η διασφάλιση της αξιοπιστίας της μετάδοσης των δεδομένων, η μείωση του BER, η υψηλή ποιότητα εξυπηρέτησης και η βέλτιστη απόδοση του συστήματος.

4. Διαλειτουργικότητα με τις προϋπάρχουσες τεχνολογίες

Το EPC αναπτύχθηκε με γνώμονα την συνύπαρξη και τη συμβατότητα του με τις υπάρχουσες 3GPP (GSM / UMTS) και non 3GPP (cdma2000 , WiMAX) τεχνολογίες αποσκοπώντας στην συνεχή συνδεσιμότητα και παροχή υπηρεσιών στο χρήστη.

2.4.4.2 Περιοχές του EPC

Στο EPC διακρίνουμε τρεις γεωγραφικές περιοχές εξυπηρέτησης (σχήμα 2.10):

- Περιοχή MME (**MME pool area**)
- Περιοχή υπηρεσιών S-GW (**S-GW service area**)
- Περιοχή παρακολούθησης (**Tracking area - TA**)

MME pool area

Ορίζεται η περιοχή μέσα στην οποία ο συνδρομητής εξυπηρετείται από ένα συγκεκριμένο MME, το serving MME χωρίς να προκύπτει ανάγκη αλλαγής. Κάθε MME pool area ελέγχεται από ένα ή περισσότερα MMEs και κάθε σταθμός βάσης eNodeB που ανήκει σε αυτή συνδέεται με όλα τα MME της περιοχής.

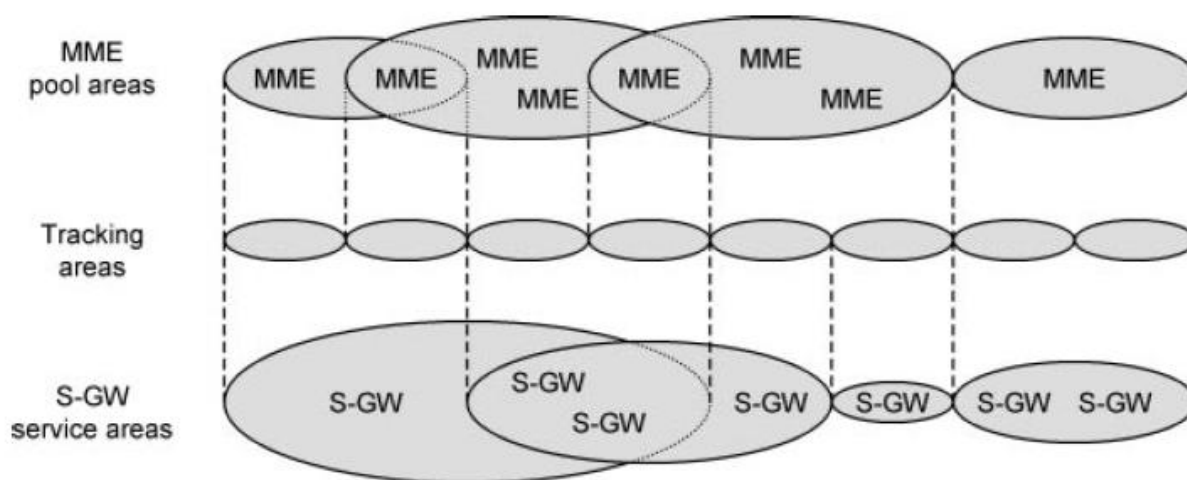
S-GW service area

Ως S-GW service area ορίζουμε την περιοχή εξυπηρέτησης ενός χρήστη από ένα serving S-GW χωρίς να καθίσταται ανάγκη αλλαγής της πύλης S-GW. Κάθε S-GW service area περιλαμβάνει μία ή περισσότερες πύλες S-GWs και κάθε σταθμός βάσης

eNodeB που ανήκει σε αυτή είναι συνδεδεμένος με όλες τις πύλες της περιοχής. Οι περιοχές MME pool area και S-GW service area δεν είναι απαραίτητο να καλύπτουν την ίδια γεωγραφική περιοχή.

Tracking area - TA

Οι tracking areas (TAs) είναι μη επικαλυπτόμενες περιοχές μικρής γεωγραφικής έκτασης οι οποίες συνθέτουν τις MME pool areas και S-GW service areas. Η περιοχή tracking area χρησιμοποιείται για την παρακολούθηση και τον εντοπισμό θέσης της κινητής συσκευής όταν αυτή βρίσκεται σε κατάσταση αδράνειας με σκοπό την αποστολή ειδοποιήσεων προς αυτήν από το δίκτυο.



Σχήμα 2.10: Περιοχές του δικτύου κορμού EPC.

2.5 Πρωτόκολλα επικοινωνίας στο LTE

Οι λειτουργικές οντότητες του δικτύου αλληλεπιδρούν μεταξύ τους μέσω διεπαφών. Για παράδειγμα η κινητή συσκευή επικοινωνεί με το δίκτυο πρόσβασης E-UTRAN μέσω της διεπαφής Uu και ο eNodeB με το δίκτυο κορμού EPC μέσω της διεπαφής S1. Η επικοινωνία καθίσταται εφικτή χάρη στην ύπαρξη πρωτοκόλλων τα οποία διαφέρουν ανάλογα με τη διεπαφή.

Το πρότυπο του LTE ορίζει δύο επίπεδα (planes) πρωτοκόλλων ανάλογα με τις υπηρεσίες που προσφέρουν:

- Το επίπεδο χρήστη (**User plane**)
- Το επίπεδο ελέγχου (**Control plane**)

Τα πρωτόκολλα που ανήκουν στο επίπεδο χρήστη είναι υπεύθυνα για την πραγματοποίηση όλων απαιτούμενων ενεργειών για τη μεταφορά των δεδομένων που αφορούν αποκλειστικά το χρήστη (user data).

Τα πρωτόκολλα του επιπέδου ελέγχου είναι υπεύθυνα για τη διαχείριση όλων των μηνυμάτων σηματοδοσίας που ανταλλάσσουν μεταξύ τους οι κόμβοι του δικτύου και αφορούν τον έλεγχο της διασύνδεσης της συσκευής σε αυτό.

Η αρχιτεκτονική υψηλού επιπέδου του LTE ορίζει τρεις κατηγορίες πρωτοκόλλων (σχήμα 2.11) με κριτήριο τις πληροφορίες που μεταφέρουν.

1. Πρωτόκολλα επιπέδου χρήστη (User plane protocols)

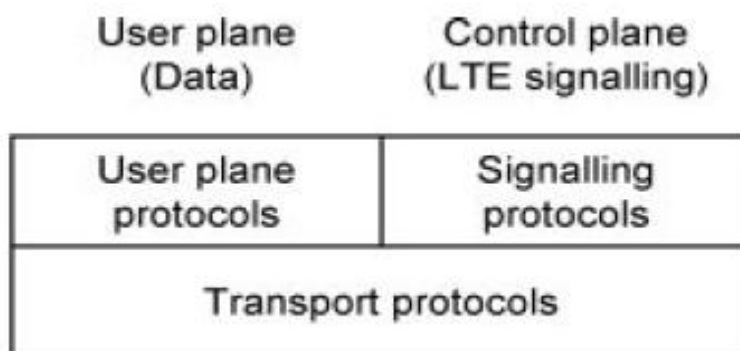
Τα User plane πρωτόκολλα αναλαμβάνουν τη δρομολόγηση και τη μεταφορά αποκλειστικά των δεδομένων που αφορούν το χρήστη.

2. Πρωτόκολλα σηματοδοσίας (Signalling protocols)

Τα πρωτόκολλα της κατηγορίας αυτής αναλαμβάνουν την μεταφορά μόνο των πληροφοριών ελέγχου και το συντονισμό των κόμβων του δικτύου.

3. Πρωτόκολλα μεταφοράς (Transport protocols)

Στην κατηγορία αυτή ανήκουν τα πρωτόκολλα που χρησιμοποιούνται για τη μετάδοση των δεδομένων του χρήστη και των μηνυμάτων σηματοδοσίας.



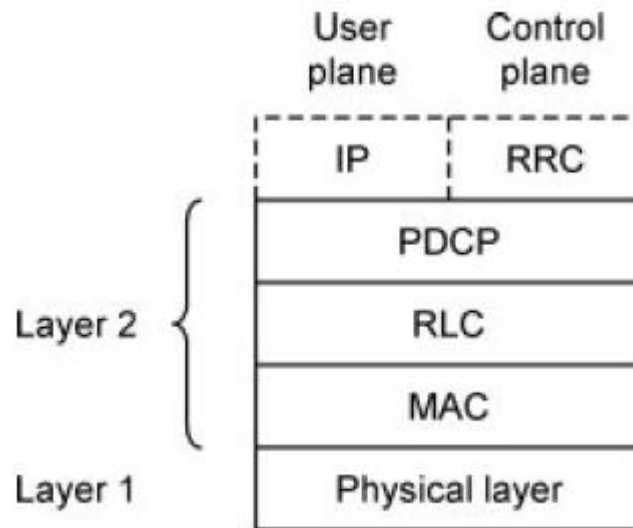
Σχήμα 2.11: Αρχιτεκτονική υψηλού επιπέδου των πρωτοκόλλων του LTE.

2.5.1 Πρωτόκολλα μεταφοράς

Στην ενότητα αυτή θα περιγράψουμε τα πρωτόκολλα μεταφοράς της διεπαφής αέρα (Uu) και του υπόλοιπου σταθερού δικτύου.

2.5.1.1 Πρωτόκολλα μεταφοράς της διεπαφής αέρα

Η διεπαφή αέρα Uu παρέχει όλες τις επικοινωνίες ανάμεσα στο χρήστη και το δίκτυο πρόσβασης E-UTRAN. Το σχήμα 2.12 παρουσιάζει τη δομή των πρωτοκόλλων που υποστηρίζονται πάνω από την διεπαφή Uu.

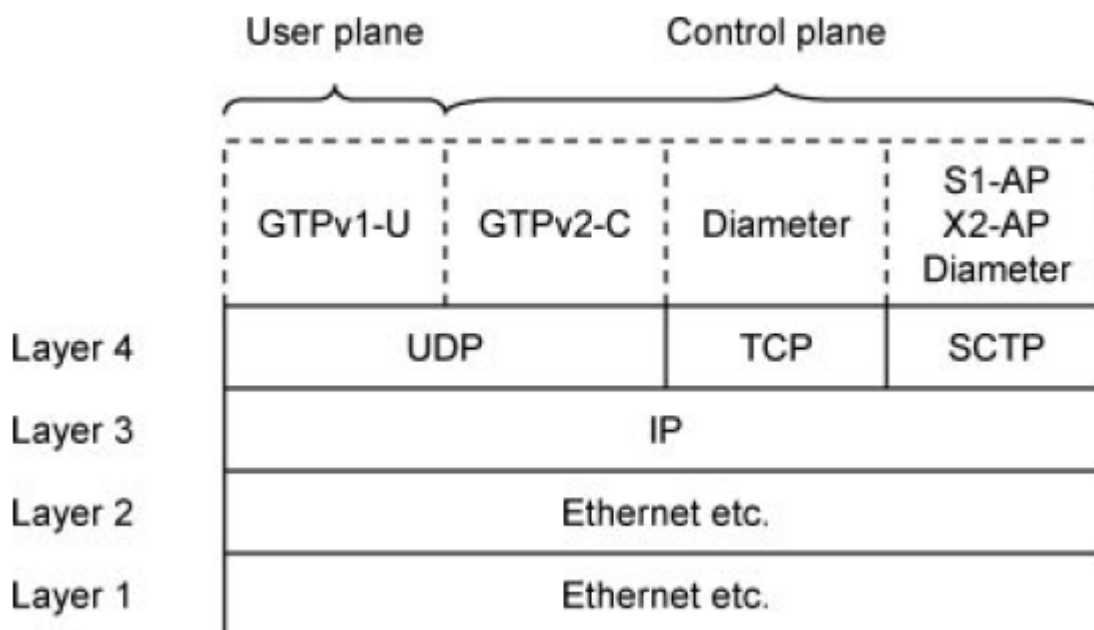


Σχήμα 2.12: Αρχιτεκτονική πρωτοκόλλων μεταφοράς της διεπαφής αέρα.

Στη βάση της αρχιτεκτονικής βρίσκεται το φυσικό επίπεδο γνωστό και ως **layer 1**. Το φυσικό επίπεδο εσωτερικά περιλαμβάνει τα υποεπίπεδα Transport channel processing, Physical channel processing και Analogue processing. Αποστολή του είναι η επεξεργασία των user data και των μηνυμάτων σηματοδότησης που λαμβάνει από το επίπεδο MAC και η κατάλληλη προετοιμασία τους για την μετάδοση στο ασύρματο μέσο. Τα επόμενα τρία πρωτόκολλα, το **MAC**, το **RLC** και το **PDCP** συγκροτούν το data link layer του μοντέλου OSI και αναφέρονται ως layer 2. Το MAC layer ασκεί έλεγχο χαμηλού επιπέδου στο φυσικό επίπεδο με το οποίο επικοινωνεί μέσω των καναλιών μεταφοράς. Το RLC layer είναι υπεύθυνο για τον έλεγχο της ασύρματης ζεύξης και διασφαλίζει την αξιοπιστία της μετάδοσης ανάλογα με τον τρόπο λειτουργίας του (TM, UM, AM). Αλληλεπιδρά με το επίπεδο MAC μέσω των λογικών καναλιών. Τέλος το PDCP layer πραγματοποιεί λειτουργίες υψηλού επιπέδου όπως το header compression/decompression, ciphering, integrity.

2.5.1.2 Πρωτόκολλα μεταφοράς του σταθερού δικτύου

Σε αντίθεση με τη διεπαφή αέρα όλες οι διεπαφές μεταξύ των κόμβων του σταθερού δικτύου χρησιμοποιούν τα πρωτόκολλα που ορίζονται από το πρότυπο IETF (Internet Engineering Task Force) και εμπεριέχονται στην αρχιτεκτονική του μοντέλου OSI. Στο σχήμα 2.13 απεικονίζεται η διαστρωμάτωση των πρωτοκόλλων μεταφοράς του σταθερού δικτύου.



Σχήμα 2.13: Αρχιτεκτονική των πρωτοκόλλων μεταφοράς του σταθερού δικτύου.

Ξεκινώντας από χαμηλά συναντάμε τα επίπεδα 1 και 2 τα οποία αντιστοιχούν στο Physical και Data link layer αντίστοιχα του OSI μοντέλου. Το δίκτυο είναι σε θέση να υποστηρίξει οποιοδήποτε πρωτόκολλο (π.χ. ethernet) είναι κατάλληλο να χρησιμοποιηθεί στα δύο αυτά επίπεδα.

Στο επίπεδο 3, το Network layer, συναντάμε το πρωτόκολλο **IP**. Σε κάθε στοιχείο του δικτύου ανατίθεται μία διεύθυνση IP. Αξιοποιώντας τη διεύθυνση προέλευσης και προορισμού επιτυγχάνεται η δρομολόγηση των δεδομένων προς κάθε σημείο του δικτύου. Το πρότυπο υποστηρίζει διευθύνσεις IPv4, IPv6 και dual stack IPv4/IPv6.

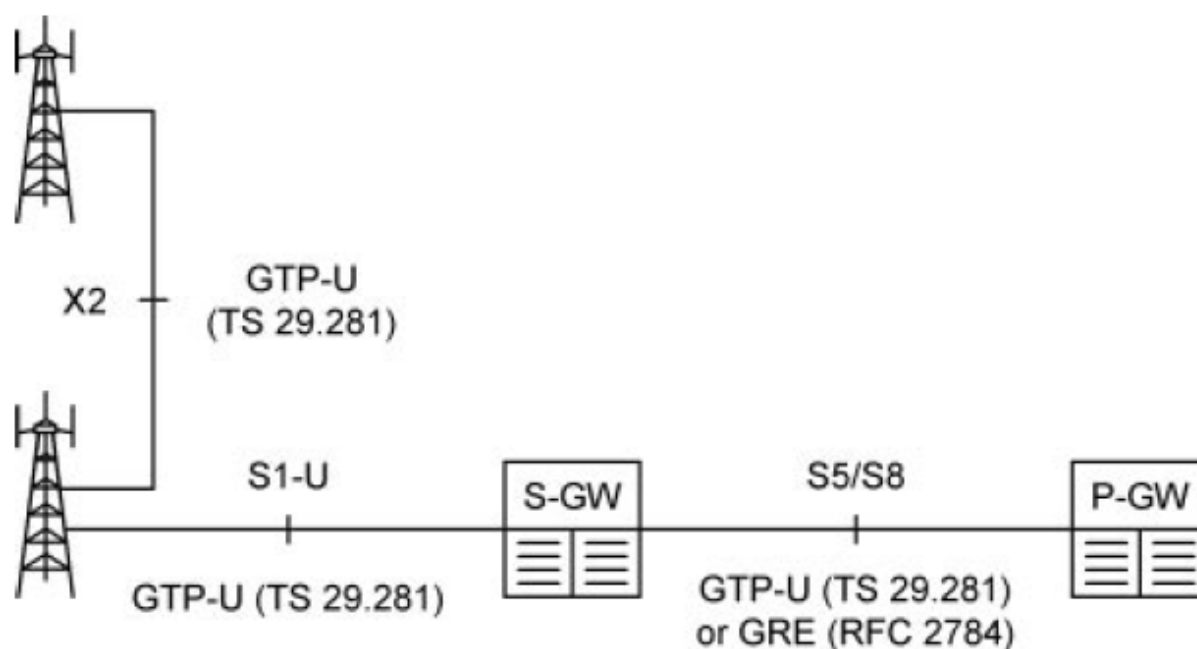
Τέλος το επίπεδο 4 (Transport layer) υποστηρίζει τρία διαφορετικά πρωτόκολλα μεταφοράς, το UDP (User Datagram Protocol), το TCP (Transmission Control Protocol) και το SCTP (Stream Control Transmission Protocol). Το **UDP** πρωτόκολλο χρησιμοποιείται για real time εφαρμογές στις οποίες ο χρόνος άφιξης των πακέτων αποτελεί κρίσιμη παράμετρο. Το πρωτόκολλο **TCP** εγγυάται την αξιόπιστη end to end μεταφορά των πακέτων δεδομένων μέσα από μηχανισμό ελέγχου λήψης (ACK, NACK) και επαναπροώθησης των χαμένων πακέτων. Το TCP ενδείκνυται για εφαρμογές όπως email, web browsing... όπου μας ενδιαφέρει να έχουμε όσο το δυνατόν λιγότερες απώλειες πακέτων και όχι τόσο ο χρόνος άφιξης τους. Το **SCTP** αξιοποιείται από το LTE επειδή συνδυάζει τα χαρακτηριστικά των UDP και TCP. Είναι message oriented όπως το UDP ενώ παράλληλα διασφαλίζει την αξιόπιστη μεταφορά όπως το TCP.

Στο LTE σε επίπεδο χρήστη χρησιμοποιείται το UDP ως πρωτόκολλο μεταφοράς των δεδομένων του συνδρομητή ενώ σε επίπεδο ελέγχου η επιλογή εξαρτάται από τα κριτήρια μετάδοσης που θέτει η σηματοδότηση.

2.5.2 Πρωτόκολλα επιπέδου χρήστη (User plane protocols)

Όλες οι πληροφορίες που αφορούν αποκλειστικά το χρήστη μεταφέρονται από και προς αυτόν μέσω του user plane. Το user plane μέσω των πρωτοκόλλων του παρέχει αξιόπιστη μετάδοση των πακέτων ανάμεσα στη συσκευή και την πύλη PDN-GW και αποτελεσματική διαχείριση της κινητικότητας του συνδρομητή.

Τα πρωτόκολλα επιπέδου χρήστη που υποστηρίζονται από το LTE απεικονίζονται στο σχήμα 2.14.



Σχήμα 2.14: Πρωτόκολλα του επιπέδου χρήστη στο LTE.

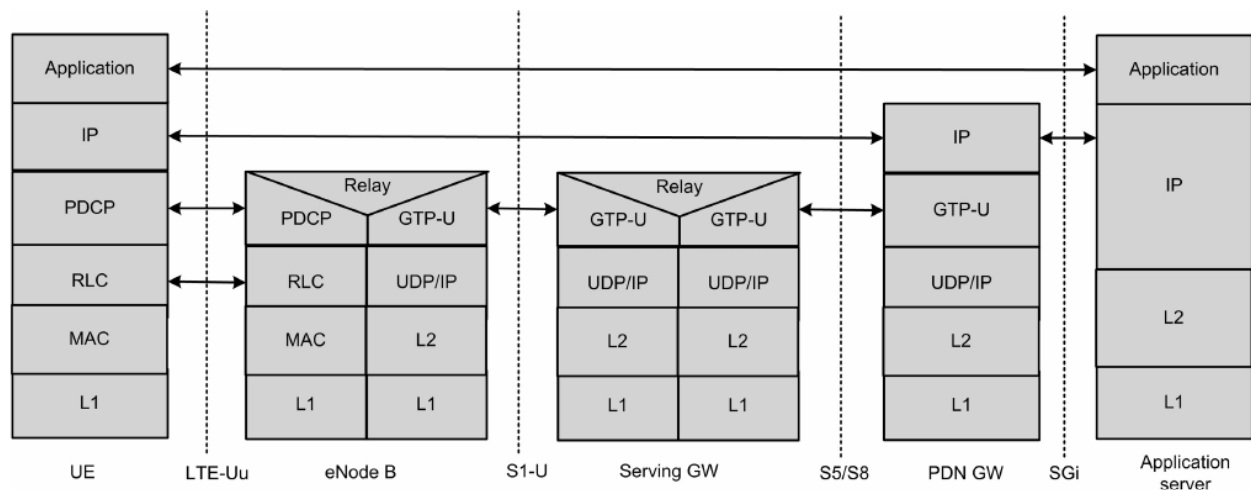
Όλες οι διεπαφές των κόμβων X2, S1-U και S5/S8 χρησιμοποιούν το 3GPP πρωτόκολλο **GTP-U** (GPRS Tunneling Protocol User Part) για τη δρομολόγηση των δεδομένων του χρήστη. Το GTP είναι μία συλλογή από πρωτόκολλα με έμφαση στην υποστήριξη της IP κινητικότητας στα 3GPP δίκτυα κορμού GPRS, UMTS και EPC. Χρησιμοποιεί την τεχνική της σήραγγας (tunnel) για την προώθηση των πακέτων ανάμεσα στους κόμβους του δικτύου. Σύμφωνα με την τεχνική tunneling ένα IP πακέτο ενθυλακώνεται μέσα σε ένα GTP-U IP πακέτο και έπειτα διαμέσου τη σήραγγας προωθείται από την πύλη PDN-GW στο σταθμό βάσης eNodeB μέσω των διεπαφών S5/S8 και S1. Το GTP-U είναι το τμήμα του GTP πρωτοκόλλου που χρησιμοποιείται στο user plane.

Η διεπαφή S5/S8 ανάμεσα στο S-GW και στο PDN-GW εκτός του GTP-U υποστηρίζει ως εναλλακτική επιλογή και το πρωτόκολλο **GRE** (Generic Routing

Encapsulation). Το GRE αποτελεί πρότυπο του IETF και βασίζεται και αυτό στην τεχνική tunneling.

Η user plane αρχιτεκτονική της διεπαφής αέρα Uu περιλαμβάνει τα πρωτόκολλα μεταφοράς Physical, MAC, RLC, PDCP και το πρωτόκολλο δρομολόγησης IP.

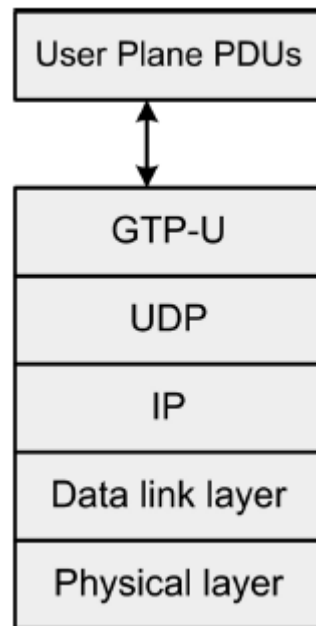
Η συνολική δομή του user plane για τη μετάδοση των δεδομένων ανάμεσα στο UE και το PDN παρουσιάζεται στο σχήμα 2.15.



Σχήμα 2.15: Αρχιτεκτονική των user plane πρωτοκόλλων για την μεταφορά δεδομένων ανάμεσα στο UE και σε έναν εξωτερικό server.

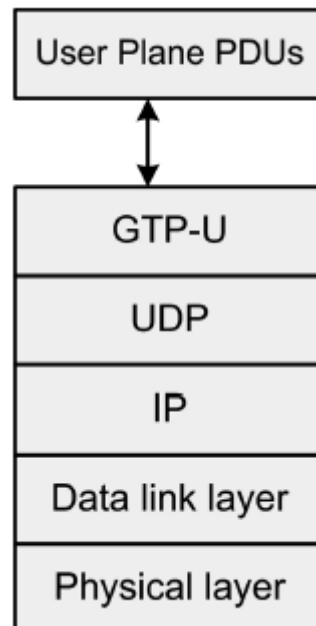
Οι διεπαφές S1-U, S5/S8 και SGi μπορούν να υποστηρίξουν διάφορες τεχνολογίες μετάδοσης όπως οπτικές ίνες, γραμμές χαλκού ή μικροκυματικές ζεύξεις σε συνάρτηση βέβαια με τις προδιαγραφές και το κόστος υλοποίησης της διασύνδεσης.

Στα επόμενα σχήματα απεικονίζεται το user plane τμήμα των διεπαφών X2 και S1.



Σχήμα 2.16: User plane part της διεπαφής X2.

Η διεπαφή X2 χρησιμοποιείται για την επικοινωνία ανάμεσα στους σταθμούς βάσης eNodeBs. Η X2 διεπαφή επιλέγει το **GTP-U** για το user plane και το UDP ως πρωτόκολλο μεταφοράς χωρίς να εγγυάται την αξιοπιστία της μετάδοσης.



Σχήμα 2.17: User plane part της διεπαφής S1.

Η διεπαφή S1-U συνδέει το σταθμό βάσης με την πύλη S-GW . Όπως και η X2 διεπαφή επιλέγει το **GTP-U** για το user plane και τα UDP/IP για το Transport και Network layer.

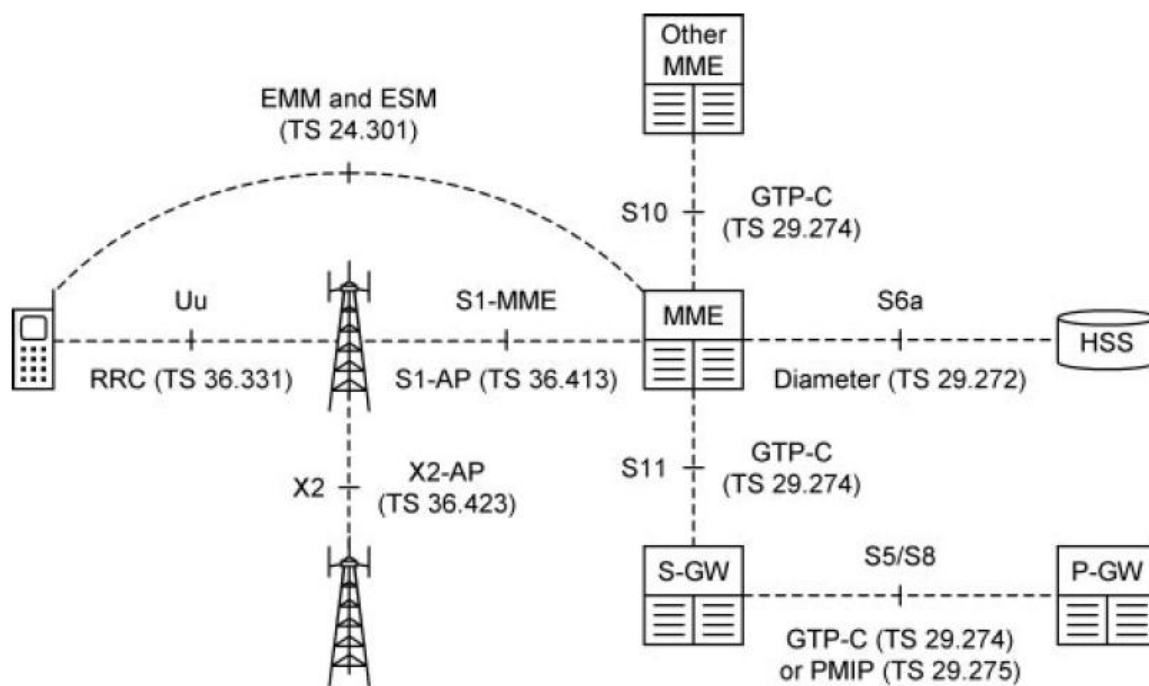
2.5.3 Πρωτόκολλα σηματοδοσίας (Signalling protocols)

Τα πρωτόκολλα σηματοδοσίας ανήκουν στο επίπεδο ελέγχου. Το control plane είναι υπεύθυνο για την προώθηση αποκλειστικά μηνυμάτων σηματοδοσίας για τον έλεγχο και την υποστήριξη της λειτουργίας του user plane.

Οι βασικές λειτουργίες των signalling πρωτοκόλλων συνοψίζονται ως εξής:

- έλεγχος της διασύνδεσης της συσκευής με το δίκτυο ασύρματης πρόσβασης E-UTRAN σε όλα τα στάδια από τη διαδικασία σύνδεσης μέχρι την αποσύνδεση του χρήστη.
- έλεγχος όλων των χαρακτηριστικών μίας ενεργούς ζεύξης με το δίκτυο πρόσβασης
- έλεγχος και διαχείριση της κινητικότητας του χρήστη για την αξιόπιστη μεταφορά των δεδομένων του
- έλεγχος και διαχείριση των πόρων του δικτύου για την διασφάλιση υψηλής ποιότητας εξυπηρέτησης

Το LTE χρησιμοποιεί αρκετά πρωτόκολλα σηματοδοσίας τα οποία απεικονίζονται στο σχήμα 2.18.



Σχήμα 2.18: Πρωτόκολλα σηματοδοσίας στο LTE.

Ο eNodeB χρησιμοποιεί το πρωτόκολλο **RRC** (Radio Resource Control) για την ανταλλαγή σηματοδότησης με την συσκευή του χρήστη πάνω από τη διεπαφή αέρα και ελέγχεται από τον κόμβο MME μέσω του πρωτοκόλλου **S1-AP** της διεπαφής S1-MME. Οι σταθμοί βάσης ανταλλάσσουν μηνύματα σηματοδότησης μεταξύ τους μέσω του **X2-AP** πάνω από τη διεπαφή X2.

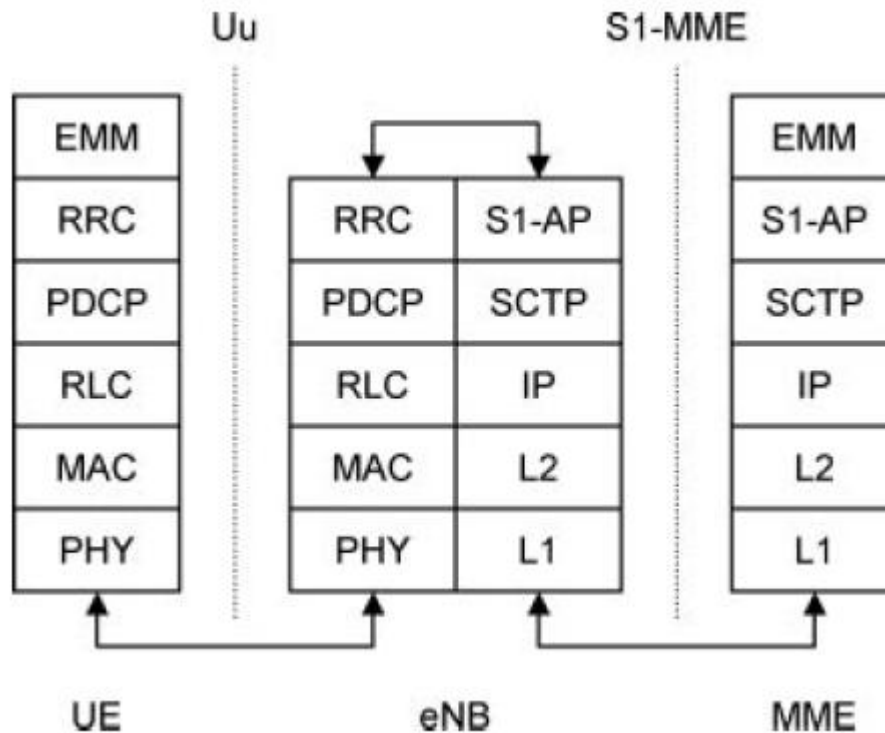
Ο κόμβος MME ελέγχει της συμπεριφορά της συσκευής σε υψηλό επίπεδο με τη χρήση των πρωτοκόλλων **EMM** (EPS Mobility Management) και **ESM** (EPS Session Management). Το EMM είναι υπεύθυνο για την κινητικότητα του UE ενώ το ESM για τον έλεγχο των ροών δεδομένων από και προς το UE. Τα δύο αυτά πρωτόκολλα ανήκουν στην κατηγορία των NAS (Non Access Stratum) πρωτοκόλλων.

Η διεπαφή S6a ανάμεσα στο MME και τη βάση δεδομένων HSS χρησιμοποιεί το πρωτόκολλο σηματοδότησης **Diameter**.

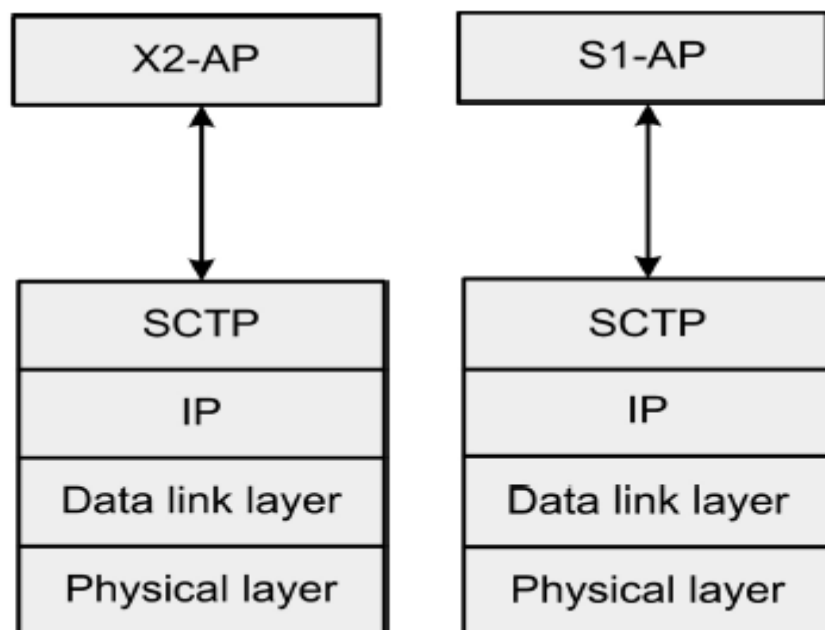
Οι διεπαφές S10 και S11 χρησιμοποιούν το πρωτόκολλο **GTP-C** το οποίο αποτελεί την έκδοση του GTP για το control plane.

Η διεπαφή S5/S8 υποστηρίζει δύο πρωτόκολλα σηματοδότησης, το **GTP-C** ή το **PMIP** (Proxy Mobile IP). Η επιλογή ανάμεσα στα δύο καθορίζεται από το εκάστοτε user plane πρωτόκολλο που θα χρησιμοποιηθεί. Αν επιλέξουμε το GTP-U ως user plane πρωτόκολλο τότε ως control plane θα χρησιμοποιηθεί το GTP-C. Σε αντίθετη περίπτωση (χρήση του GRE στο user plane) ορίζεται το PMIP ως πρωτόκολλο σηματοδότησης.

Στα σχήματα που ακολουθούν παρουσιάζεται η διαστρωμάτωση των πρωτοκόλλων του επιπέδου ελέγχου καθώς και το control plane τμήμα των διεπαφών X2 και S1.



Σχήμα 2.19: Αρχιτεκτονική του control plane για την ανταλλαγή μηνυμάτων σηματοδότησης ανάμεσα στο UE και το MME.

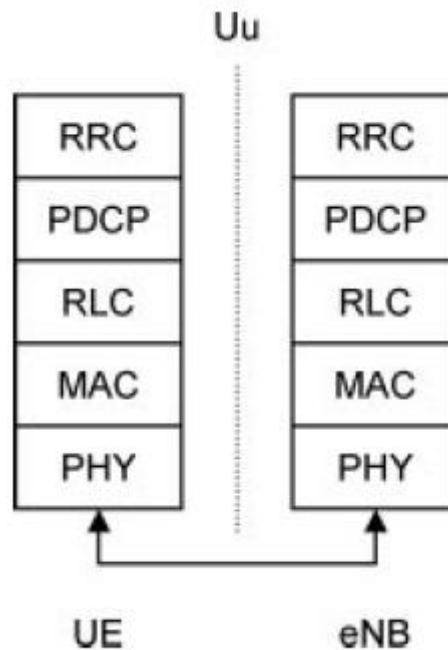


Σχήμα 2.20: Control plane part των διεπαφών X2 και S1 αντίστοιχα.

Στο επίπεδο ελέγχου οι διεπαφές X2 και S1 επιλέγουν το **SCTP** ως πρωτόκολλο μεταφοράς σε αντίθεση με το UDP του επιπέδου χρήστη.

2.5.3.1 Σηματοδοσία Access Stratum (AS)

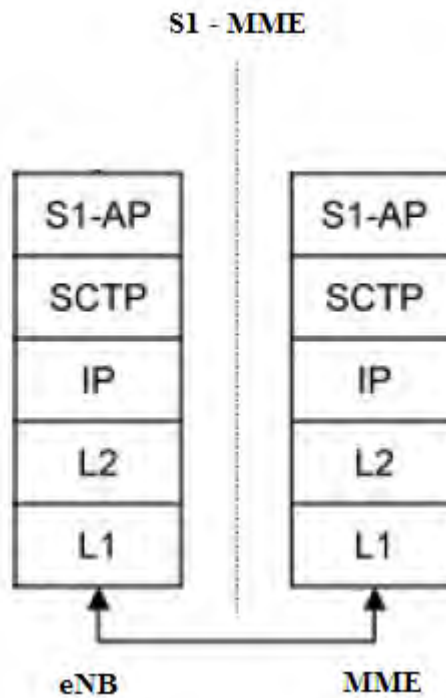
Η στοίβα των πρωτοκόλλων του control plane για την επικοινωνία της κινητής συσκευής και του σταθμού eNodeB ορίζει τα πρωτόκολλα με την ονομασία Uu Access Stratum (**Uu AS**).



Σχήμα 2.21: Access Stratum πρωτόκολλα της διεπαφής αέρα (Uu).

Το πρωτόκολλο **RRC** (Radio Resource Control) συγκροτεί το layer 3 της υποδομής και παρέχει όλες τις λειτουργίες ελέγχου του Uu AS. Είναι υπεύθυνο για την εγκατάσταση και εποπτεία των ραδιοφορέων (radio bearers) ανάμεσα στη συσκευή και το σταθμό βάσης, την αναμετάδοση των πληροφοριών συστήματος, την διαχείριση των μεταγωγών σε επίπεδο σταθμών βάσης (inter eNodeB handover), τη μεταφορά της σηματοδοσίας NAS καθώς και για τη διαμόρφωση όλων των χαμηλότερων επιπέδων της AS υποδομής.

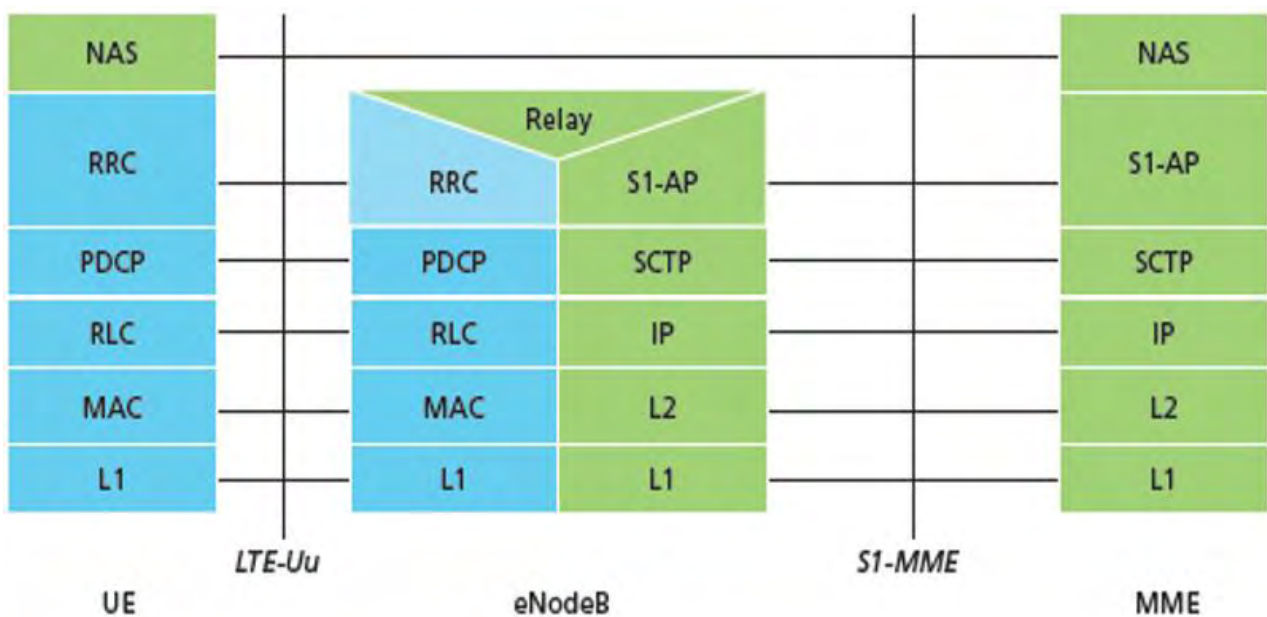
Η στοίβα των πρωτοκόλλων του control plane για την επικοινωνία ανάμεσα στο σταθμό βάσης eNodeB και τον κόμβο MME μέσω της διεπαφής S1-MME ορίζει τα πρωτόκολλα με την ονομασία S1 Access Stratum (**S1 AS**).



Σχήμα 2.22: Access Stratum πρωτόκολλα της διεπαφής S1.

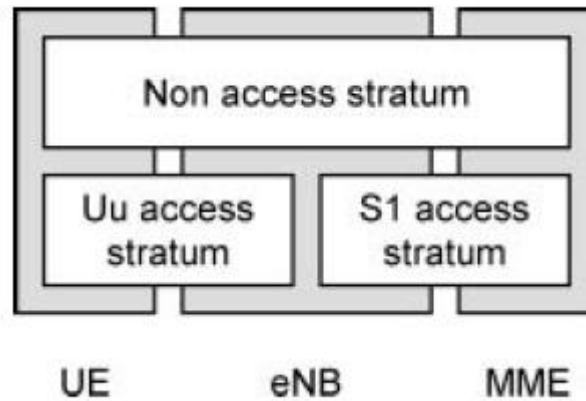
2.5.3.2 Σηματοδότηση Non Access Stratum (NAS)

Ο έλεγχος του εξοπλισμού του χρήστη σε υψηλό επίπεδο πραγματοποιείται από το MME μέσω των πρωτοκόλλων σηματοδότησης **NAS**.



Σχήμα 2.23: Αρχιτεκτονική για την ανταλλαγή σηματοδότησης NAS.

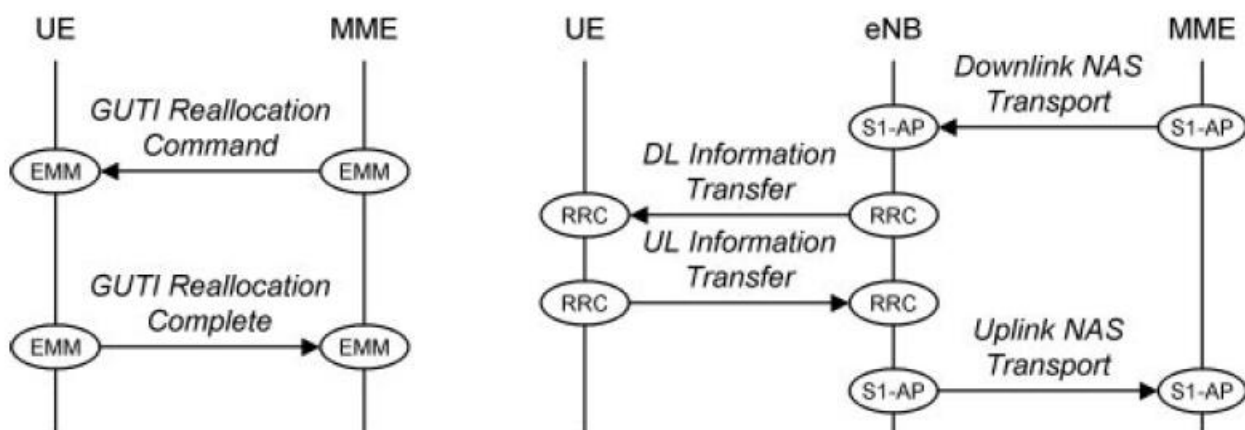
Ωστόσο επειδή δεν υφίσταται απ' ευθείας σύνδεση του κόμβου MME με τη συσκευή προκειμένου να μεταδοθούν οι εντολές ελέγχου NAS χρησιμοποιούνται τα Access Stratum πρωτόκολλα των διεπαφών Uu και S1.



Σχήμα 2.24: Πρωτόκολλα NAS και AS της διεπαφής αέρα (Uu).

Συγκεκριμένα τα EMM και ESM μηνύματα ενσωματώνονται στα μηνύματα S1-AP και RRC. Τα S1-AP μηνύματα διακρίνονται σε Uplink NAS Transport και Downlink NAS Transport ενώ τα RRC σε UL Information Transfer και DL Information Transfer.

Η διαδικασία αποστολής ενός MME μηνύματος μέσω των S1-AP και RRC παρουσιάζεται στο σχήμα 2.25.



Σχήμα 2.25: Ανταλλαγή MME μηνύματος με τη χρήση των Access Stratum πρωτοκόλλων των διεπαφών Uu και S1.

2.6 Διαχείριση φορέων του EPS

Το LTE είναι ένα τηλεπικοινωνιακό περιβάλλον όπου συνυπάρχουν πολλές διαφορετικές υπηρεσίες με το συνδρομητή να απολαμβάνει τη δυνατότητα της ταυτόχρονης πρόσβασης σε αυτές. Κάθε υπηρεσία ωστόσο έχει τα δικά της ποιοτικά χαρακτηριστικά τα οποία αποτυπώνονται μέσα από τον παράγοντα QoS. Το QoS καθορίζει τις κρίσιμες παραμέτρους μετάδοσης όπως τον ελάχιστο ρυθμό μετάδοσης, το επιτρεπτό delay, το αποδεκτό BER κ.α.. Καθίσταται επομένως αναγκαία η ύπαρξη κατάλληλων μηχανισμών διασφάλισης της αξιοπιστίας στη μετάδοση και επίτευξης υψηλής ποιότητας παρεχομένων υπηρεσιών.

Το EPS χρησιμοποιεί την έννοια του φορέα (bearer) για την δρομολόγηση της κίνησης από και προς τη φορητή συσκευή. Ένας **φορέας** είναι μία ροή IP πακέτων με ένα καθορισμένο επίπεδο ποιότητας εξυπηρέτησης (QoS). Στο LTE ο πιο σημαντικός φορέας ονομάζεται EPS bearer. Ο **EPS bearer** είναι ουσιαστικά ένας αγωγός δεδομένων διπλής κατεύθυνσης ανάμεσα στο χρήστη και την πύλη PDN-GW ο οποίος συσχετίζεται με ένα συγκεκριμένο QoS.

Το E-UTRAN σε συνεργασία με το EPC μέσω των πρωτοκόλλων GTP-U και GTP-C εγκαθιστούν και διαχειρίζονται τους EPS φορείς. Ένας φορέας EPS μπορεί να αποτελείται από μία ή περισσότερες υπηρεσίες ροών δεδομένων με την κάθε υπηρεσία να περιέχει μία ή περισσότερες ροές πακέτων. Το LTE καθορίζει το ίδιο επίπεδο εξυπηρέτησης (QoS) για όλες τις ροές που ανήκουν στον ίδιο EPS φορέα.

Στο LTE οι φορείς διακρίνονται στις εξής κατηγορίες:

Minimum Guaranteed Bit Rate (GBR) bearers

Ως GBR ορίζεται ένας φορέας ο οποίος παρέχει εγγυημένο ρυθμό μετάδοσης. Η δέσμευση των πόρων για την δημιουργία του παραμένει καθ' όλη τη διάρκεια ύπαρξής του. Ρυθμός μετάδοσης μεγαλύτερος του εγγυημένου είναι εφικτός υπό την προϋπόθεση ότι υφίστανται διαθέσιμοι πόροι. Κάθε GBR φορέας μπορεί να επιτύχει υπό κατάλληλες συνθήκες έναν μέγιστο ρυθμό μετάδοσης ο οποίος καλείται MBR (Maximum Bit Rate). Οι φορείς GBR χρησιμοποιούνται για την υποστήριξη εφαρμογών πραγματικού χρόνου όπως το VoIP.

Non GBR bearers

Ο Non GBR bearer δεν παρέχει καμία εγγύηση ως προς το ρυθμό μετάδοσης και ως εκ τούτου καθίσταται κατάλληλος για εφαρμογές όπως web browsing, FTP κ.α.. Το δίκτυο ακολουθεί διαφορετική πολιτική διαχείρισης των πόρων για τους Non GBR φορείς καθώς δεν προβαίνει σε μόνιμη δέσμευση για την υλοποίησή τους.

Default bearers

Κατά τη διαδικασία ενεργοποίησης του εξοπλισμού του χρήστη, η φορητή συσκευή λαμβάνει μία IP διεύθυνση και συνδέεται σε μία προκαθορισμένη πύλη PDN-GW και σε ένα προεπιλεγμένο δίκτυο πακέτων δεδομένων (PDN). Η σύνδεση αυτή επιτυγχάνεται μέσω της δημιουργίας ενός φορέα ο οποίος ονομάζεται default bearer. Ο default bearer παραμένει ενεργός καθ' όλη τη χρονική διάρκεια που η συσκευή είναι ενεργοποιημένη αποσκοπώντας στην παροχή συνεχούς IP συνδεσιμότητας στο χρήστη. Κάθε φορά που η συσκευή συνδέεται για πρώτη φορά σε ένα PDN δημιουργείται ένας νέος default bearer και εκχωρείται μία νέα IP διεύθυνση στο χρήστη. Ένας default bearer είναι πάντα non GBR. Αυτό συμβαίνει για την ορθότερη διαχείριση των περιορισμένων πόρων εφόσον ο default bearer παραμένει μόνιμα ενεργός μέχρι την αποσύνδεση του συνδρομητή από το δίκτυο. Το QoS που υποστηρίζει ένας default bearer καθορίζεται από τον κόμβο MME.

Dedicated bearers

Από τη στιγμή που έχει εγκατασταθεί ο default bearer για ένα συγκεκριμένο PDN, η συσκευή μπορεί να αιτηθεί τη δημιουργία ενός ή περισσότερων dedicated bearers για το ίδιο δίκτυο πακέτων δεδομένων. Η δημιουργία ενός dedicated bearer δεν συνοδεύεται από εκχώρηση νέας IP διεύθυνσης. Ο dedicated bearer για τη δρομολόγηση των πακέτων χρησιμοποιεί την διεύθυνση που έχει ανατεθεί στη συσκευή κατά τη δημιουργία του default bearer στην πρώτη σύνδεση με το συγκεκριμένο PDN. Ο dedicated bearer μπορεί να είναι GBR ή Non GBR ανάλογα με τις απαιτήσεις της μετάδοσης που θέτει η υπηρεσία και παρέχει υψηλότερη ποιότητα εξυπηρέτησης συγκριτικά με τον default bearer.

Σε μία φορητή συσκευή μπορούν να αντιστοιχούν μέχρι 11 EPS bearers για την ταυτόχρονη σύνδεση σε διαφορετικά δίκτυα πακέτων δεδομένων και την υποστήριξη πολλαπλών υπηρεσιών και ροών πακέτων.

Το LTE ορίζει δύο βασικές παραμέτρους για την περιγραφή της συσχέτισης ενός φορέα με το επίπεδο εξυπηρέτησης που παρέχει: το QCI (QoS Class Identifier) και το ARP (Allocation and Retention Priority).

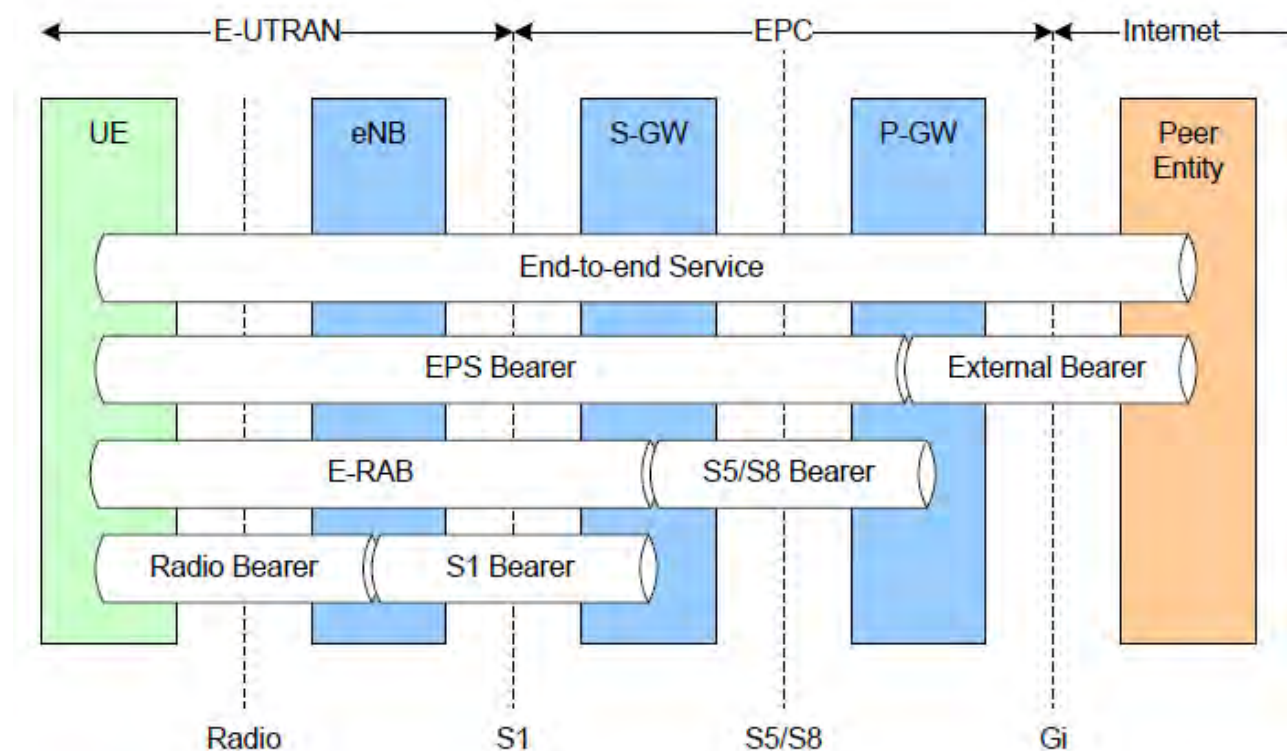
Η *πaráμετρος QCI* υποδεικνύει στο σταθμό βάσης τις προδιαγραφές που απαιτούνται για την αξιόπιστη μετάδοση μίας ροής πακέτων. Ο eNodeB γνωρίζοντας την τιμή του QCI δημιουργεί τον κατάλληλο φορέα που εξασφαλίζει πλήρως τις απαιτήσεις και το QoS. Το LTE έχει τυποποιήσει ένα σύνολο από QCIs με το κάθε ένα να συνοδεύεται από συγκεκριμένα χαρακτηριστικά. Τα χαρακτηριστικά αυτά αφορούν τον τύπο του EPS bearer (GBR ή Non GBR), την προτεραιότητα μεταξύ πολλαπλών ροών υπηρεσιών, το packet delay, το Packet error rate και το Packet loss καθώς και τις υποστηριζόμενες υπηρεσίες. Στον πίνακα 2.2 αναγράφονται οι κατηγορίες QCI.

QCI	Resource type	Priority	Packet delay budget (ms)	Packet error loss rate	Example services
1	GBR	2	100	10^{-2}	Conversational voice
2	GBR	4	150	10^{-3}	Conversational video (live streaming)
3	GBR	5	300	10^{-6}	Non-conversational video (buffered streaming)
4	GBR	3	50	10^{-3}	Real time gaming
5	Non-GBR	1	100	10^{-6}	IMS signalling
6	Non-GBR	7	100	10^{-3}	Voice, video (live streaming), interactive gaming
7	Non-GBR	6	300	10^{-6}	Video (buffered streaming)
8	Non-GBR	8	300	10^{-6}	TCP-based (e.g. WWW, e-mail) chat, FTP, p2p file sharing, progressive video, etc.
9	Non-GBR	9	300	10^{-6}	

Πίνακας 2.2: Κατηγορίες QoS Class Identifiers (QCIs) στο LTE.

Η **παράμετρος ARP** ορίζει τη σειρά εγκατάστασης ανάμεσα σε ανταγωνιστικούς φορείς με κριτήριο την προτεραιότητα η οποία καθορίζεται από την ιεράρχηση των φορέων.

Ο φορέας EPS δεν είναι ενιαίος και δεν δημιουργείται εξ' ολοκλήρου από τη συσκευή μέχρι την πύλη PDN-GW. Αποτελείται από τρεις μικρότερους φορείς, καθένας εκ των οποίων εκτείνεται κατά μήκος της αντίστοιχης διεπαφής. Η σύνθεση του φορέα EPS απεικονίζεται στο σχήμα που ακολουθεί.



Σχήμα 2.26: Αρχιτεκτονική του EPS φορέα στο LTE.

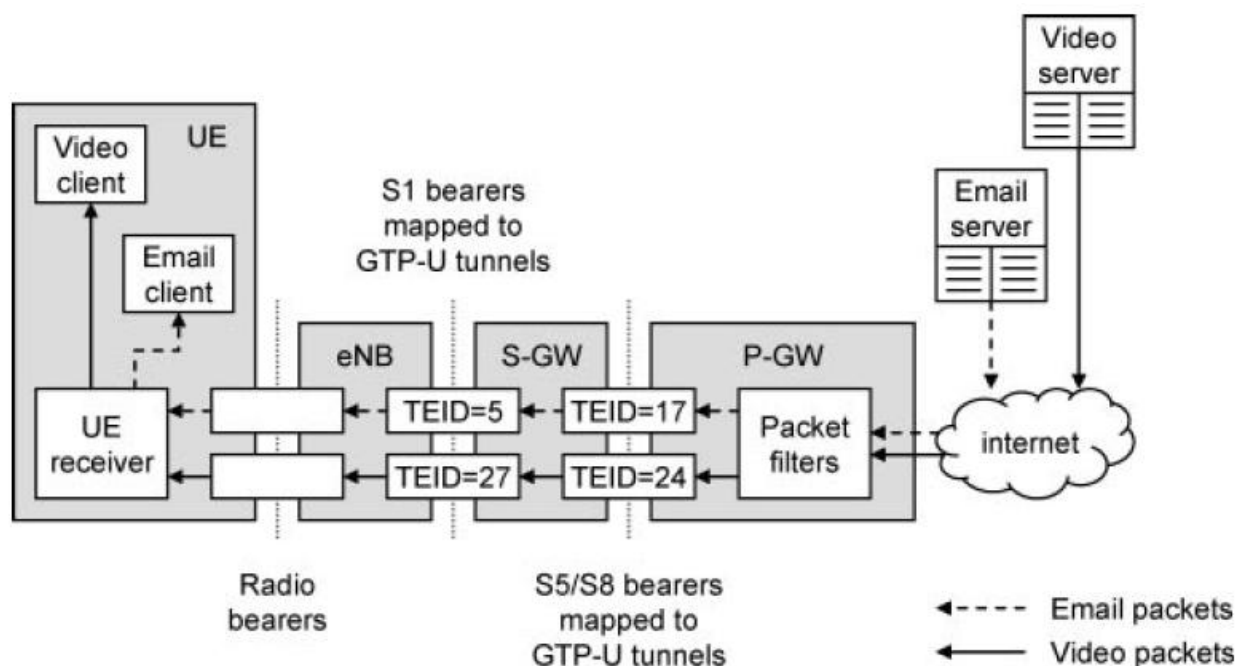
Οι φορείς που συνθέτουν τον EPS bearer είναι οι radio, S1 και S5/S8 bearers. Ο **S5/S8 bearer** δημιουργείται πάνω από την αντίστοιχη διεπαφή και μεταφέρει τα πακέτα δεδομένων ανάμεσα στις πύλες PDN-GW και S-GW. Ο **S1 bearer** υλοποιείται στη διεπαφή S1 και μεταδίδει τα πακέτα από S-GW στο eNodeB. Ο **radio bearer** εγκαθιδρύεται πάνω από τη διεπαφή Uu και δρομολογεί τα δεδομένα μεταξύ του σταθμού βάσης και του εξοπλισμού του χρήστη. Οι φορείς S5/S8 και S1 δημιουργούνται με την τεχνική tunneling μέσω του GTP-U ενώ ο φορέας radio από την αρχιτεκτονική των πρωτοκόλλων του E-UTRAN. Η σύνδεση του radio με τον S1 bearer αναφέρεται και ως **E-RAB** (Evolved Radio Access Bearer).

2.6.1 Δημιουργία φορέων με χρήση του πρωτοκόλλου GTP

Όπως αναφέραμε στην προηγούμενη ενότητα ο μέγιστος αριθμός φορέων EPS που αντιστοιχούν σε έναν χρήστη είναι 11. Κάθε φορέας συσχετίζεται με μία ροή IP πακέτων και ένα καθορισμένο QoS. Για να υπάρξει μετάδοση της ροής των δεδομένων σε δύο κόμβους του δικτύου για κάθε φορέα πρέπει να δημιουργηθεί ο αντίστοιχος αγωγός (tunnel). Το user plane πρωτόκολλο GTP-U είναι αρμόδιο για την αντιστοίχιση ανάμεσα στους S5/S8 και S1 φορείς και τους κατάλληλους S5/S8 και S1 GTP-U αγωγούς.

Κάθε αγωγός χαρακτηρίζεται από δύο αναγνωριστικά **TEIDs** (Tunnel Endpoint Identifier) για την κατερχόμενη και ανερχόμενη ζεύξη αντίστοιχα. Τα TEIDs

προκύπτουν από το πρωτόκολλο GTP-C και αποθηκεύονται από τους κόμβους οι οποίοι επικοινωνούν μέσω του GTP-U tunnel. Η διαδικασία του tunneling για την κατερχόμενη ζεύξη απεικονίζεται στο σχήμα 2.27.



Σχήμα 2.27: Διαδικασία της τεχνικής tunneling για τη μεταφορά δεδομένων στην κατερχόμενη ζεύξη.

Ο χρήστης του παραδείγματός μας έχει πρόσβαση σε δύο διαφορετικές υπηρεσίες, έναν email και έναν video server. Κάθε υπηρεσία παράγει μία ξεχωριστή ροή πακέτων η οποία μεταδίδεται από το Διαδίκτυο στην πύλη PDN-GW χρησιμοποιώντας την αρχιτεκτονική πρωτοκόλλων του μοντέλου OSI.

Στον κόμβο PDN-GW πραγματοποιείται το φιλτράρισμα των πακέτων έτσι ώστε κάθε ροή να αντιστοιχηθεί στον κατάλληλο φορέα. Το φιλτράρισμα υλοποιείται με βάση τα πρότυπα ροής κίνησης TFTs (Traffic Flow Templates). Κάθε EPS φορέας συσχετίζεται με ένα TFT. Κάθε TFT αποτελείται από ένα σύνολο φίλτρων, ένα για κάθε ροή πακέτων που απαρτίζουν το φορέα. Τα TFTs χρησιμοποιούν πληροφορίες όπως οι IP διευθύνσεις των συσκευών προέλευσης και προορισμού καθώς και τους αριθμούς των θυρών UDP ή TCP των εφαρμογών των πακέτων. Συγκρίνοντας το κάθε πακέτο με όλα τα φίλτρα του TFT η πύλη PDN-GW συσχετίζει το πακέτο με το σωστό φορέα.

Μετά το φιλτράρισμα το επόμενο βήμα είναι η αντιστοίχιση του φορέα στο σωστό GTP-U tunnel για τη μετάδοση από το PDN-GW στο S-GW. Στο PDN-GW το πρωτόκολλο GTP-U δημιουργεί έναν GTP-U header στον οποίο εσωκλείει την IP διεύθυνση του S-GW που εξυπηρετεί τη συσκευή και την ταυτότητα TEID για κάθε φορέα. Στο παράδειγμά μας έχουμε δύο ροές πακέτων (email και video packets

flows) που φθάνουν στο PDN-GW όπου μετά το φιλτράρισμα προκύπτουν δύο αντίστοιχοι S5/S8 φορείς. Το GTP-U συσχετίζει τους δύο αυτούς φορείς με δύο GTP-U tunnels. Συγκεκριμένα για κάθε ένα από τους φορείς S5/S8 δημιουργεί ένα GTP-U header όπου εσωκλείει την ταυτότητα TEID (17 για τα email packets και 24 για τα video packets) και την IP διεύθυνση του S-GW εξυπηρέτησης του χρήστη. Έπειτα δρομολογεί τα δεδομένα προς τον κόμβο S-GW.

Ο κόμβος S-GW λαμβάνει τα πακέτα και διαβάζει τις πληροφορίες του GTP-U header. Με βάση τις ταυτότητες TEIDs αναγνωρίζει τις δύο ροές των πακέτων και τις αντιστοιχεί με τη σειρά του σε δύο νέους S1 φορείς. Τα ο πρωτόκολλο GTP-U αναλαμβάνει εκ νέου τη σύνδεση των S1 φορέων σε δύο S1 tunnels. Δημιουργεί και πάλι δύο GTP-U headers, ένα για κάθε φορέα, εσωκλείει την IP διεύθυνση του serving eNodeB και τα νέα αναγνωριστικά TEIDs (5 για τα email packets και 27 για τα video packets). Έπειτα ο S-GW δρομολογεί τα πακέτα προς τον αντίστοιχο σταθμό βάσης.

Τέλος ο eNodeB διαβάζει τις πληροφορίες του GTP-U header που έλαβε, συσχετίζει τις ροές των δεδομένων με τους κατάλληλους radio φορείς και αποστέλλει τα πακέτα στη σωστή φορητή συσκευή.

Εκτός από την πύλη PDN-GW φίλτρα (TFTs) υφίστανται και στον εξοπλισμό του χρήστη (UL-TFTs). Στην περίπτωση που η συσκευή επιθυμεί να αποστείλει δεδομένα προς το δίκτυο τα UL-TFTs διαχωρίζουν τις ροές των πακέτων ως προς τους κατάλληλους φορείς και ακολουθείται η ίδια διαδικασία που περιγράψαμε για την ανερχόμενη ζεύξη.

2.6.2 Φορείς σηματοδοσίας (Signalling bearers)

Το LTE ορίζει τρεις επιπρόσθετους ασύρματους φορείς (radio bearers) για την υποστήριξη της σηματοδοσίας ανάμεσα στη συσκευή και το σταθμό βάσης μέσω της διεπαφής αέρα. Οι φορείς αυτοί ονομάζονται SRBs (Signal Radio Bearers) και είναι οι SRB0, SRB1 και SRB2.

Ο **SRB0** χρησιμοποιείται για την ανταλλαγή πληροφοριών σηματοδοσίας του πρωτοκόλλου RRC κατά τη διαδικασία εγκαθίδρυσης μίας RRC σύνδεσης (RRC connection establishment). Ο φορέας SRB0 διαμορφώνεται από τις πληροφορίες συστήματος τις οποίες αναμεταδίδει ο σταθμός βάσης προς όλα τις συσκευές της κυψέλης που εξυπηρετεί και δημιουργείται πάντα πριν τον SRB1.

Ο **SRB1** διαμορφώνεται με βάση τα μηνύματα σηματοδοσίας που μεταφέρονται μέσω του SRB0 και χρησιμοποιείται κατά τη διαδικασία καθιέρωσης επικοινωνίας ανάμεσα στη συσκευή και το δίκτυο πρόσβασης καθώς και για την μεταφορά

ορισμένων EMM και ESM μηνυμάτων. Ο SRB1 προηγείται της δημιουργίας του SRB2.

Ο **SRB2** προκύπτει από τα μηνύματα που ανταλλάσσονται μέσω του SRB1 και χρησιμοποιείται κατά τη διαδικασία καθιέρωσης επικοινωνίας της συσκευής με το δίκτυο κορμού EPC. Ο φορέας αυτός μεταφέρει όλα τα εναπομείναντα EMM και ESM μηνύματα.

2.7 Καταστάσεις του εξοπλισμού χρήστη (UE states)

Το LTE ορίζει τρεις κατηγορίες καταστάσεων για τη φορητή συσκευή με βάση τη σηματοδότηση NAS και AS. Οι δύο πρώτες κατηγορίες προκύπτουν από το NAS πρωτόκολλο EMM και διαχειρίζονται την κινητικότητα και τη σύνδεση της συσκευής. Η τρίτη κατηγορία συνδέεται με το AS πρωτόκολλο RRC το οποίο είναι υπεύθυνο για τον έλεγχο των ασύρματων πόρων του δικτύου.

2.7.1 Διαχείριση της κινητικότητας EPS (EPS Mobility Management - EMM)

Ο κόμβος MME ελέγχει την κινητικότητα της συσκευής μέσω του πρωτοκόλλου EMM. Η EMM κατάσταση υποδεικνύει αν ο εξοπλισμός του χρήστη είναι εγγεγραμμένος ή όχι στο δίκτυο κορμού EPC. Προκύπτουν έτσι δύο καταστάσεις, η EMM_REGISTERED και η EMM_DEREGISTERED.

Στην **κατάσταση EMM_REGISTERED** η συσκευή είναι ενεργοποιημένη και έχει εγγραφεί σε ένα serving MME και ένα serving S-GW. Διαθέτει μία IP διεύθυνση, έχει δημιουργηθεί ο default bearer και συνδέεται σε ένα default PDN μέσω μίας default PDN-GW.

Σε **κατάσταση EMM_DEREGISTERED** η συσκευή είναι απενεργοποιημένη ή βρίσκεται εκτός εμβέλειας κάλυψης του LTE δικτύου και δεν μπορεί να εξυπηρετηθεί από κάποιο MME και S-GW. Οι λειτουργίες που υποστηρίζονται σε κάθε EMM κατάσταση παρουσιάζονται συνοπτικά στον πίνακα 2.3.

EMM - DEREGISTERED	EMM - REGISTERED
UE switched off / out of coverage	UE registered with EPC
No serving MME or S-GW	Serving MME and S-GW allocated
No IP address	IP address allocated
No default EPS bearer	Default EPS bearer exists

Πίνακας 2.3: Λειτουργίες καταστάσεων MME.

2.7.2. Διαχείριση της σύνδεσης EPS (EPS Connection Management - ECM)

Από τη διαχείριση της σύνδεσης EPS προκύπτει η δεύτερη κατηγορία καταστάσεων της συσκευής: ECM_IDLE και ECM_CONNECTED, οι οποίες ελέγχονται από το πρωτόκολλο EMM. Η ECM κατάσταση εξαρτάται από το αν η συσκευή είναι ενεργή ή βρίσκεται σε κατάσταση αναμονής (standby).

Όταν ο εξοπλισμός του χρήστη είναι ενεργός τότε βρίσκεται σε κατάσταση ECM_CONNECTED. Σε **ECM_CONNECTED** έχουν δημιουργηθεί όλοι οι φορείς για τη μεταφορά των δεδομένων και της σηματοδότησης, η συσκευή έχει συνδεθεί σε ένα serving S-GW και είναι σε θέση να επικοινωνεί ελεύθερα με το δίκτυο.

Σε κατάσταση αναμονής η συσκευή ορίζεται ως ECM_IDLE. Σε **ECM_IDLE** δεν υφίσταται καμία σύνδεση του UE με το E-UTRAN και ως εκ τούτου οι radio και S1 bearers έχουν απεγκατασταθεί και διατηρείται μόνο ο φορέας S5/S8. Η συσκευή μπορεί να κινείται ελεύθερα με τον κόμβο MME να μην γνωρίζει την ακριβή θέση της παρά μόνο την περιοχή παρακολούθησης TA στην οποία είναι εγγεγραμμένη. Ο εξοπλισμός του χρήστη όταν βρεθεί σε μία νέα μη δηλωμένη περιοχή παρακολούθησης μέσω της αποστολής ενός EMM Tracking Area Update Request αναφέρει στον κόμβο MME την αλλαγή αυτή. Ο MME είναι υπεύθυνος να την συνεχή ενημέρωση των TAs του χρήστη και την αποστολή μηνυμάτων paging για την ειδοποίηση της συσκευής αναφορικά με την ύπαρξη αποθηκευμένων πακέτων.

ECM - IDLE	ECM - CONNECTED
UE on standby	UE active
No S1 or radio bearers	All bearers exists
UE localized to tracking area	UE localized to serving eNodeB
Paging	Any communication possible
Service requests	
Tracking area updates	

Πίνακας 2.4: Λειτουργίες καταστάσεων ECM.

2.7.3 Διαχείριση ασύρματων πόρων (Radio Resource Control - RRC)

Η τρίτη κατηγορία καταστάσεων συνδέεται με τη διαχείριση των ασύρματων πόρων. Η κατάσταση RRC εξαρτάται από το αν η συσκευή είναι ενεργή ή αδρανής από την οπτική όμως των πρωτοκόλλων Access Stratum - AS. Προκύπτουν έτσι οι καταστάσεις RRC_IDLE και RRC_CONNECTED οι οποίες ελέγχονται από το πρωτόκολλο RRC.

Μία ενεργή συσκευή είναι σε κατάσταση **RRC_CONNECTED** όταν όλοι οι φορείς είναι εγκατεστημένοι, ο χρήστης εξυπηρετείται από ένα serving eNodeB και υποστηρίζονται όλα τα σενάρια μεταγωγής.

Μία αδρανής συσκευή είναι σε κατάσταση RRC_IDLE. Σε **RRC_IDLE** οι radio και S1 bearers δεν υφίστανται προκειμένου να ελαχιστοποιηθεί η σηματοδότηση. Δεν υπάρχει serving eNodeB και η επικοινωνία της συσκευής με το δίκτυο είναι περιορισμένη. Το δίκτυο αποστέλλει μηνύματα paging ή ενημερώνει το UE σχετικά με αλλαγές στις πληροφορίες συστήματος. Αν η συσκευή επιθυμεί να συνδεθεί στο δίκτυο αποστέλλει κατάλληλα RRC μηνύματα για την εκκίνηση των διαδικασιών εγκαθίδρυσης ζεύξης.

RRC - IDLE	RRC - CONNECTED
UE on standby	UE active
No S1 or radio bearers	All bearers exists
No serving eNodeB	Serving eNodeB
Cell reselection	Handovers
Paging	Any communication possible
RRC connection requests	

Πίνακας 2.5: Λειτουργίες καταστάσεων RRC

Στο σχήμα 2.28 απεικονίζονται γραφικά όλοι οι πιθανοί συνδυασμοί των NAS και AS καταστάσεων της συσκευής του χρήστη.

	1: Off	Attaching	2: Idle / Registered	Connecting to EPC	3: Active
EMM	DEREGISTERED		REGISTERED		
ECM	IDLE				CONNECTED
RRC	IDLE	CONNECTED	IDLE	CONNECTED	

Σχήμα 2.28: Συνδυασμοί των NAS και AS καταστάσεων.

Μία ενεργή συσκευή είναι πάντα σε κατάσταση ECM_CONNECTED και RRC_CONNECTED ενώ μία αδρανής πάντα σε ECM_IDLE και RRC_IDLE.

2.8 Συμπεράσματα

Στο κεφάλαιο αυτό αναλύσαμε την συνολική αρχιτεκτονική του συστήματος EPS. Παρουσιάσαμε την υποδομή των δικτύων ασύρματης πρόσβασης (E-UTRAN) και κορμού (EPC), περιγράψαμε τους εσωτερικούς κόμβους που απαρτίζουν το δίκτυο, τις λειτουργίες που επιτελούν, τις διεπαφές αλληλεπίδρασής τους καθώς και τα πρωτόκολλα επικοινωνίας τους. Ορίσαμε τον θεμελιώδη φορέα EPS και περιγράψαμε τον τρόπο δημιουργίας του και τη συνεισφορά του στην μετάδοση των πακέτων δεδομένων ανάμεσα στο χρήστη και στο δίκτυο. Τέλος αναφερθήκαμε στις καταστάσεις που μπορεί να ευρίσκεται η φορητή συσκευή του χρήστη.

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 3^ο

Αρχιτεκτονική του LTE Physical layer

3.1 Εισαγωγή

Το τρίτο κεφάλαιο αναφέρεται στις αρχές και τα χαρακτηριστικά που διέπουν τη λειτουργία της διεπαφής του αέρα (Uu) και στον τρόπο υλοποίησής τους στο LTE. Αρχικά περιγράφονται οι τεχνολογίες OFDMA και SC-FDM και η συμβολή τους στην επίτευξη της φασματικής ευελιξίας του προτύπου. Ακολουθεί η παρουσίαση της αρχιτεκτονικής της διεπαφής του ασύρματου μέσου, των καναλιών για τη μεταφορά της πληροφορίας μεταξύ των διαφόρων πρωτοκόλλων της και των διαδικασιών του transport και physical channel processing για την μετατροπή των πακέτων δεδομένων σε σήμα κατάλληλο προς μετάδοση. Τέλος πραγματοποιείται η απεικόνιση των πληροφοριών των φυσικών καναλιών και σημάτων στο πεδίο του χρόνου και της συχνότητας υπό τη μορφή του resource grid και υλοποιείται η δομή του FDD downlink πλαισίου για τη δημιουργία των OFDM συμβόλων.

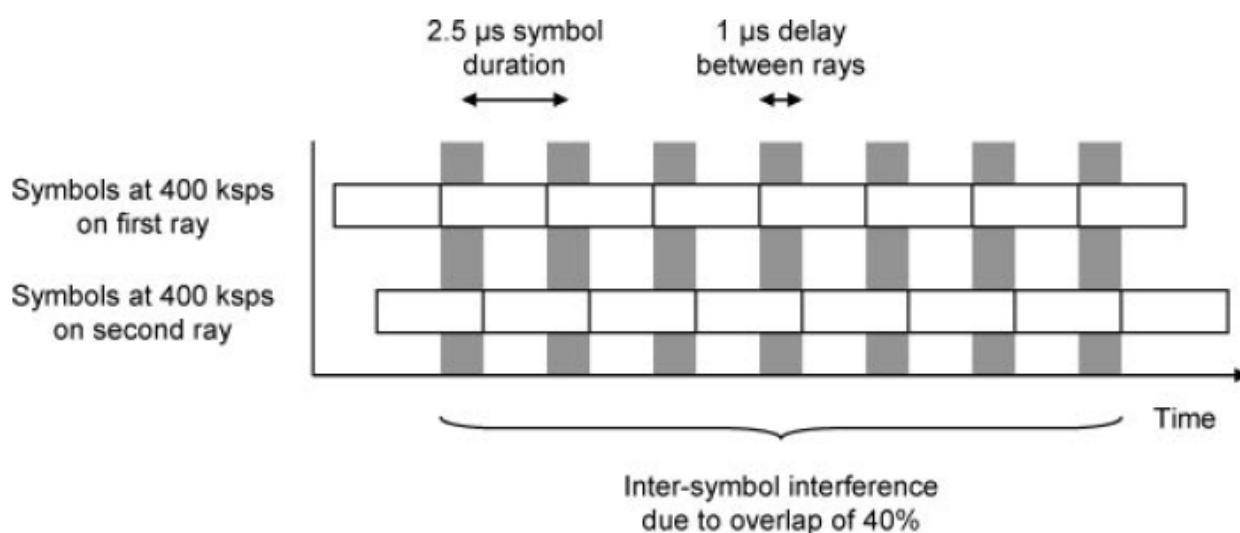
3.2 LTE Air interface

Η διεπαφή αέρα (Uu) του LTE βασίζεται στην τεχνική της ορθογώνιας πολυπλεξίας με διαίρεση συχνότητας (Orthogonal Frequency Division Multiplexing - **OFDM**). Για τη μετάδοση των δεδομένων στην κατερχόμενη και ανερχόμενη ζεύξη χρησιμοποιούνται οι τεχνολογίες **OFDMA** (Orthogonal Frequency Division Multiple Access) και **SC-FDM** (Single Carrier – Frequency Division Multiplexing) αντίστοιχα. Η τεχνολογία OFDM επιτυγχάνει αποδοτική αξιοποίηση του φάσματος παρέχοντας εκτεταμένο σύνολο συχνοτήτων λειτουργίας και δυνατότητα διαμόρφωσης του εύρους ζώνης της μετάδοσης. Καθίσταται ιδιαίτερα ελκυστική χάρη στην ακριβή αναπαράσταση του μεταδιδόμενου σήματος στο πεδίο του χρόνου και της συχνότητας. Επιπλέον η διεπαφή αέρα υποστηρίζει τεχνικές πολλαπλών κεραιών **receive / transmit diversity**, **spatial multiplexing** και **beamforming** επιτρέποντας την εκμετάλλευση της χωρικής διάστασης και επιτυγχάνοντας υψηλό κέρδος ισχύος του λαμβανόμενου σήματος, αυξημένο ρυθμό μετάδοσης και μεγαλύτερο εύρος κάλυψης του κυττάρου. Τέλος ενσωματώνει τεχνικές **link adaptation** υποστηρίζοντας τη δυνατότητα τροποποίησης των παραμέτρων μετάδοσης όπως τον τύπο της διαμόρφωσης και την κωδικοποίηση (Modulation and Coding Schemes - MCS), την εκπεμπόμενη ισχύ, το transmission mode και μεθόδους διαχείρισης σφαλμάτων (Forward Error Correction - **FEC**, Hybrid ARQ - **HARQ**) με σκοπό την προσαρμογή στις συνθήκες του καναλιού και την επίτευξη αξιόπιστης

επικοινωνίας, μέγιστης απόδοσης και υψηλής ποιότητας εξυπηρέτησης παρεχομένων υπηρεσιών (QoS).

3.3 Τεχνική ορθογώνιας πολυπλεξίας με διαίρεση συχνότητας (Orthogonal Frequency Division Multiplexing - OFDM)

Η διεπαφή του αέρα καθίσταται ιδιαίτερα εχθρική ως προς τη μετάδοση των τηλεπικοινωνιακών σημάτων. Πέραν των απωλειών λόγω της διάδοσης και της ύπαρξης θορύβου στο ασύρματο κανάλι το μεταδιδόμενο σήμα υποφέρει επιπλέον από το φαινόμενο της πολυόδευσης (multipath). Σύμφωνα με το μηχανισμό του multipath ένα εκπεμπόμενο σήμα υφίσταται ανακλάσεις λόγω της μορφολογίας του περιβάλλοντος και ακολουθεί πολλές διαφορετικές διαδρομές προς το δέκτη. Εάν τα μήκη διάδοσης των μεγαλύτερων και μικρότερων διαδρομών διαφέρουν, τότε ο δέκτης λαμβάνει πολλαπλά αντίγραφα της ίδιου σήματος χρονικά μετατοπισμένα. Το γεγονός αυτό έχει ως συνέπεια η λήψη ενός νέου συμβόλου πληροφορίας που αντιστοιχεί σε μία μικρή διαδρομή να συμπίπτει με την μη ολοκληρωμένη λήψη του προηγούμενου σύμβολου μίας μεγαλύτερης διαδρομής. Τα δύο σύμβολα επικαλύπτονται στο δέκτη προκαλώντας το φαινόμενο της διασυμβολικής παρεμβολής (Inter Symbol Interference - **ISI**). Όσο πιο έντονη είναι η παρεμβολή τόσο μεγαλύτερο το ποσοστό επικάλυψης με αποτέλεσμα να δυσχεραίνεται η διαδικασία ανίχνευσης του μεταδιδόμενου συμβόλου.



Σχήμα 3.1: Εμφάνιση διασυμβολικής παρεμβολής σε περιβάλλον πολυόδευσης

Το σχήμα 3.1 απεικονίζει μία μετάδοση μονής φέρουσας (single carrier) όπου τα σύμβολα αποστέλλονται σειριακά με ρυθμό **400ksps**. Η διάρκεια του κάθε συμβόλου είναι $T_s = 2.5\mu s$ και η χρονική διασπορά της κρουστικής απόκρισης του καναλιού ισούται με $\tau = 1\mu s$. Ο χρόνος τ αντιστοιχεί σε μία διαφορά περίπου 300m ανάμεσα

στις μεγαλύτερες και μικρότερες διαδρομές από τον πομπό στον δέκτη. Με βάση τα συγκεκριμένα χρονικά μεγέθη παρατηρείται μία επικάλυψη **40%** μεταξύ των συμβόλων και εμφάνιση διασυμβολικής παρεμβολής.

Όσο αυξάνει ο ρυθμός μετάδοσης η διάρκεια του συμβόλου T_s μειώνεται με συνέπεια να μεγαλώνει το ποσοστό επικάλυψης και το φαινόμενο της ISI να εντείνεται. Για να αντιμετωπίσουμε την διασυμβολική παρεμβολή πρέπει η περίοδος του συμβόλου T_s να είναι μικρότερη της χρονικής διασποράς τ και το κανάλι να είναι όσο το δυνατόν λιγότερα συχνοτικά επιλεκτικό. Με γνώμονα τις δύο αυτές συνιστώσες αναπτύχθηκε η τεχνική της πολυπλεξίας με διαίρεση συχνότητας (Frequency Division Multiplexing - **FDM**) ή αλλιώς μετάδοση πολλαπλών φερουσών. Η λειτουργία της FDM βασίζεται στην διαίρεση του διαθέσιμου εύρους ζώνης W ενός wideband σήματος σε **k στενοζωνικά υποκανάλια** ίσου φάσματος. Τα k υποκανάλια ονομάζονται υποφέρουσες (subcarriers) και προκύπτουν από τη σχέση 3.1.

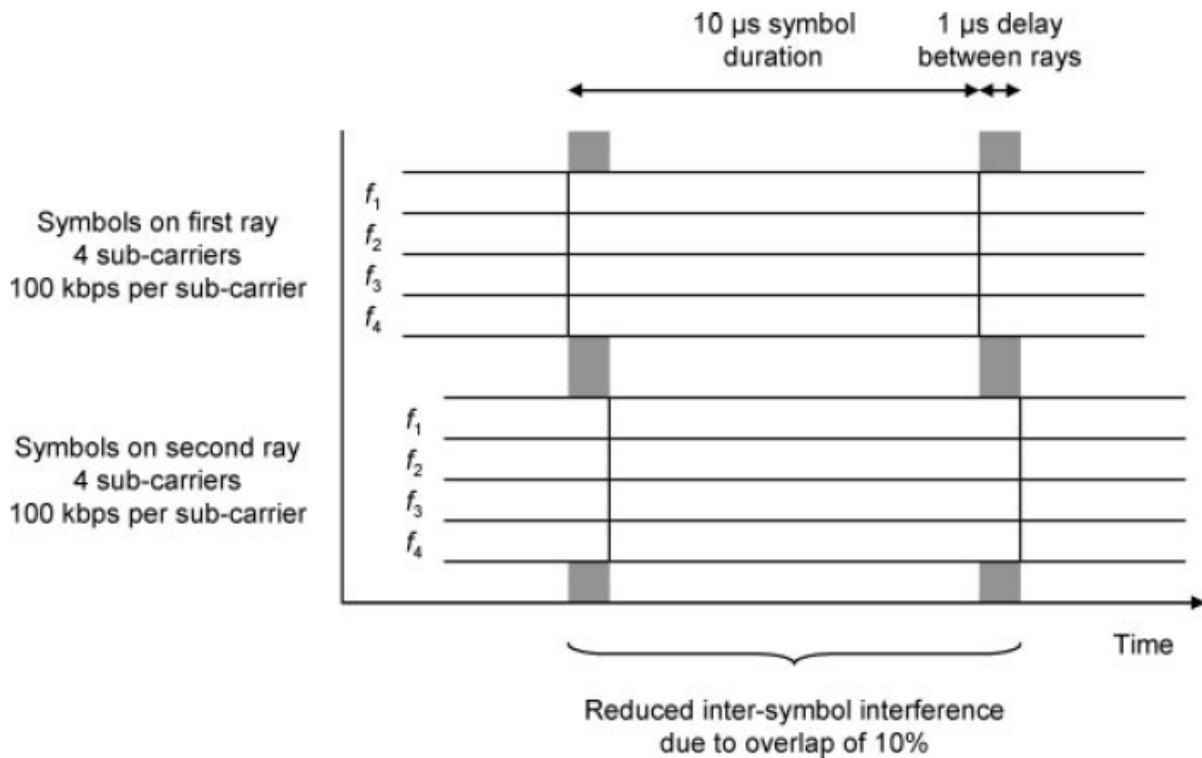
$$\Delta f = \frac{W}{k} \quad (3.1)$$

Από τη σχέση 3.1 παρατηρούμε ότι η αύξηση της τιμής του k οδηγεί σε μείωση του φάσματος Δf των υποκαναλιών. Εφόσον το εύρος ζώνης Δf είναι αρκετά στενό η απόκριση της συχνότητας μπορεί να θεωρηθεί σταθερή. Αυτό σημαίνει ότι η κρουστική απόκριση του κάθε υποκαναλιού είναι περιορισμένη και ως εκ τούτου η διασυμβολική παρεμβολή μειώνεται αισθητά.

Η τεχνική FDM στηρίζεται στην παράλληλη μετάδοση με το κάθε υποκανάλι να αναλαμβάνει τη μεταφορά διαφορετικού συμβόλου πληροφορίας. Το πλεονέκτημά της έναντι της μετάδοσης μονής φέρουσας έγκειται στο γεγονός ότι ο ρυθμός των συμβόλων σε κάθε υποφέρουσα μειώνεται κατά τον παράγοντα k και επομένως η χρονική διάρκεια του συμβόλου αυξάνει όπως προκύπτει από τη σχέση 3.2.

$$T = k \cdot T_s \quad (3.2)$$

Επιλέγοντας την κατάλληλη τιμή της παραμέτρου k επιτυγχάνουμε διάρκεια συμβόλου T μεγαλύτερη από τη χρονική διασπορά τ , συνθήκη απαραίτητη για τη θωράκιση έναντι της διασυμβολικής παρεμβολής.

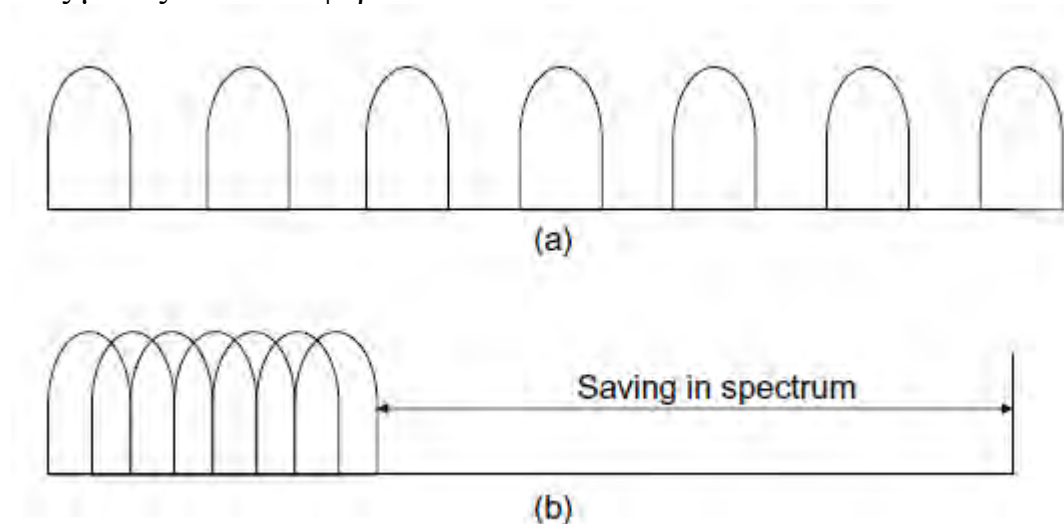


Σχήμα 3.2: Μείωση της διασυμβολικής παρεμβολής με χρήση της τεχνικής FDM.

Στο σχήμα 3.2 το διαθέσιμο φάσμα υποδιαιρείται σε τέσσερα υποκανάλια με συχνότητες f_1 , f_2 , f_3 και f_4 . Κάθε υποκανάλι υποστηρίζει ρυθμό μετάδοσης **100ksps** που ισοδυναμεί με το $\frac{1}{4}$ του αρχικού των 400ksps. Αντίστοιχα η διάρκεια του συμβόλου τετραπλασιάστηκε από τα 2.5 μ s στα **10 μ s**. Με την χρονική διασπορά τ να παραμένει σταθερή και ίση με 1 μ s διαπιστώνουμε ότι το ποσοστό επικάλυψης μεταξύ των συμβόλων μειώθηκε από 40% σε μόλις **10%** με συνέπεια τον περιορισμό της διασυμβολικής παρεμβολής στο $\frac{1}{4}$ της αρχικής και τη σημαντική βελτίωση της λειτουργίας του δέκτη.

Η τεχνική FDM αν και περιορίζει σε μεγάλο βαθμό την ISI μέσω της χρήσης πολλαπλών φερουσών και της μείωσης της διάρκειας του συμβόλου λόγω της παράλληλης μετάδοσης εν τούτοις δεν επιτυγχάνει την καλύτερη διαχείριση του φάσματος του ασύρματου καναλιού. Το μεγάλο της μειονέκτημα προκύπτει από την ανάγκη ύπαρξης μεγάλων αποστάσεων ασφαλείας (**guard intervals**) μεταξύ των γειτονικών υποκαναλιών. Τα διαστήματα αυτά είναι απαραίτητα και διασφαλίζουν τη διάκριση μεταξύ των υποκαναλιών. Σε αντίθετη περίπτωση προκύπτει επικάλυψη με αποτέλεσμα την εμφάνιση παρεμβολών μεταξύ γειτονικών υποφορέων γνωστή ως Inter Carrier Interference - **ICI**. Ωστόσο οι αποστάσεις ασφαλείας είναι αρκετά μεγάλες ώστε αθροιζόμενες συνεπάγονται δέσμευση και σπατάλη φάσματος συγκριτικά με τη μεταδιδόμενη πληροφορία και το συνολικό εύρος ζώνης W του καναλιού.

Η λύση στο προαναφερθέν πρόβλημα επήλθε μέσα από την τεχνολογία της ορθογωνίας πολυπλεξίας με διαίρεση συχνότητας - **OFDM** (Orthogonal Frequency Division Multiplexing), η οποία αναπτύχθηκε το 1966 από τα Bell Labs. Αν και η βασική αρχή λειτουργίας είναι ίδια με την απλή FDM υπάρχει ένα καθοριστικό πλεονέκτημα που τη διαφοροποιεί. Σε ένα σύστημα OFDM τα φάσματα των υποκαναλιών μπορούν να επικαλύπτονται χωρίς να προκαλείται το φαινόμενο της Inter Carrier Interference καθιστώντας έτσι δυνατό τον διαχωρισμό τους από το δέκτη. Χάρη στη δυνατότητα αυτή επιτελείται καλύτερη αξιοποίηση του εύρους ζώνης μέσω της εξοικονόμησης πολύτιμου φάσματος από την έλλειψη αποστάσεων ασφαλείας μεταξύ των υποφορέων.



Σχήμα 3.3: Εξοικονόμηση Φάσματος (a) FDM spectrum (b) OFDM spectrum

Η επικάλυψη των υποφορέων και η εξάλειψη της ICI επιτυγχάνεται χάρη στη μαθηματική ιδιότητα της **ορθογωνιότητας** πάνω στην οποία βασίζεται η αρχή λειτουργίας της OFDM. Κάθε υποκανάλι χρησιμοποιεί για τη μετάδοση των συμβόλων του διαφορετική υποφέρουσα συχνότητα f_k . Αν η διαφορά μεταξύ δύο υποφερουσών είναι ίση με $\Delta f = 1 / T$, όπου T ορίζουμε την χρονική διάρκεια του συμβόλου, τότε αποδεικνύεται ότι οι υποφέρουσες είναι μεταξύ τους ορθογώνιες και ικανοποιούν τη μαθηματική εξίσωση:

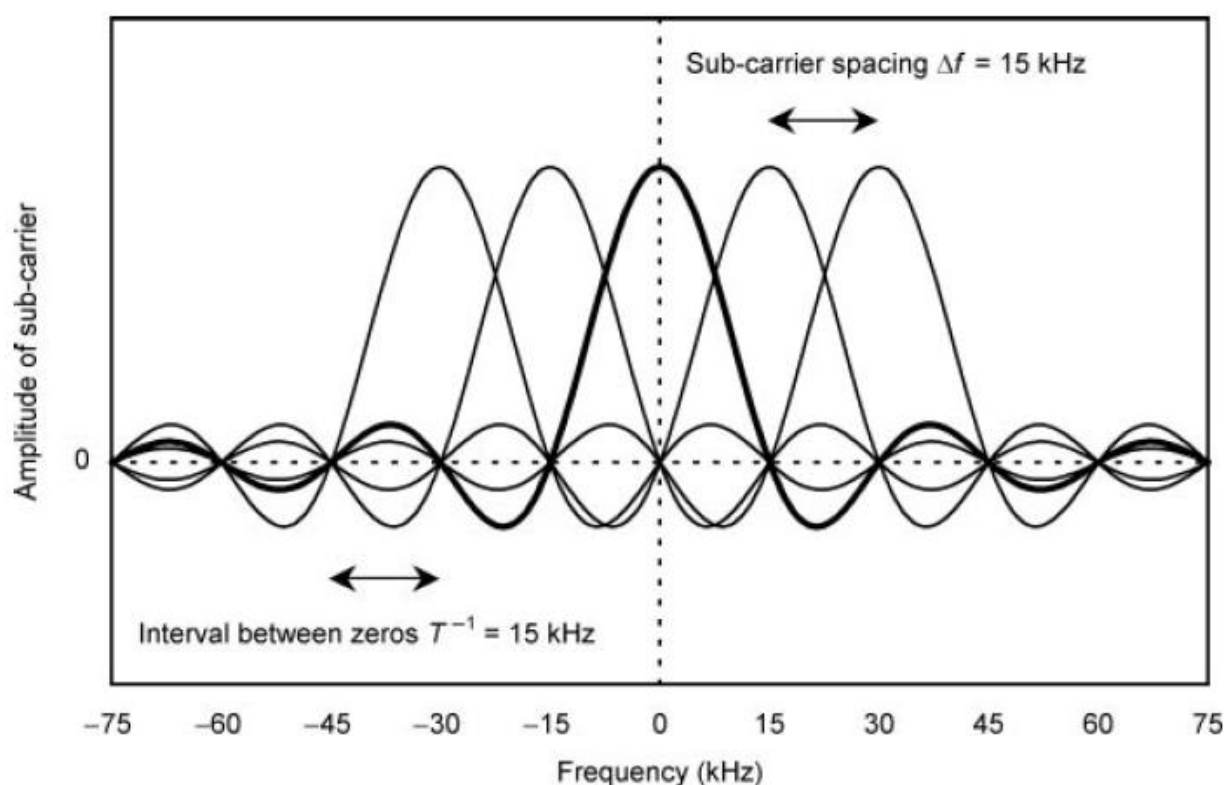
$$\int_0^T \cos(2\pi f_k + \varphi_k) * \cos(2\pi f_j + \varphi_j) dt = 0 \quad (3.3)$$

όπου:

f_k, f_j : οι κεντρικές υποφέρουσες συχνότητες των k και j γειτονικών υποκαναλιών
 φ_k, φ_j : οι διαφορές φάσεις τους

Χάρη στην ιδιότητα της ορθογωνιότητας αποδίδεται και η ονομασία ορθογώνια FDM.

Στο πεδίο της συχνότητας κάθε υποκανάλι εμφανίζει τη μέγιστη απόκρισή του στην συχνότητα f_k . Το φάσμα του κάθε παλμού περιγράφεται από τη συνάρτηση **sinc**. Το εύρος ζώνης της κάθε υποφέρουσας είναι ίσο με $2T^{-1}$ ενώ οι μηδενισμοί της συνάρτησης παρουσιάζονται σε ακέραια πολλαπλάσια της φασματικής απόστασης Δf . Εφόσον το $\Delta f = T^{-1}$ και εξασφαλίζεται η ορθογωνιότητα η μέγιστη τιμή της κάθε υποφέρουσας συμπίπτει με τα μηδενικά όλων των υπόλοιπων. Η σχεδίαση αυτή διευκολύνει το δέκτη ο οποίος είναι σε θέση να μετρήσει το πλάτος και τη φάση του κάθε υποφορέα χωρίς να επηρεάζεται από την παρεμβολή των άλλων. Στο LTE η φασματική απόσταση Δf ορίζεται στα **15kHz** και συνεπώς η χρονική διάρκεια συμβόλου είναι ίση με **66.7μs**.

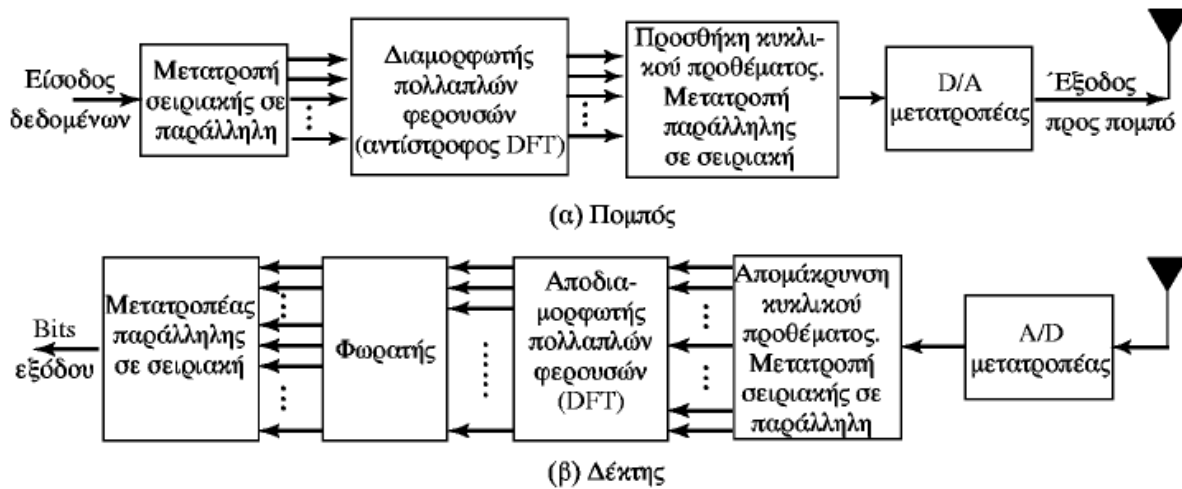


Σχήμα 3.4: Απόκριση συχνότητας υποφορέων στο OFDM σύστημα

Το συνολικό εύρος ζώνης ενός συστήματος OFDM αποτελείται από την κεντρική φέρουσα συχνότητα **F_c** γύρω από την οποία κατανέμονται συμμετρικά σε ίσες αποστάσεις όλες οι υποφέρουσες.

Η τεχνική OFDM χρησιμοποιεί τον αντίστροφο διακριτό μετασχηματισμό Fourier (Inverse Discrete Fourier Transform - **IDFT**) για την δημιουργία του OFDM σήματος. Αν ο αριθμός των υποκαναλιών k είναι αρκετά μεγάλος τότε ο IDFT υλοποιείται αποδοτικότερα με τη χρήση του αλγορίθμου Fast Fourier Transform (**FFT**). Η εφαρμογή του μετασχηματισμού Fourier αποτελεί την πλέον οικονομική και εύκολη υλοποίηση για την μετατροπή του OFDM σήματος από το πεδίο της συχνότητας στο πεδίο του χρόνου (IFFT) και αντίστροφα (FFT) διατηρώντας την

ιδιότητα της ορθογωνιότητας. Το σχήμα 3.5 παρουσιάζει τη δομή ενός OFDM πομπού και δέκτη.



Σχήμα 3.5: Πομπός και δέκτης συστήματος OFDM

Στον πομπό τα δεδομένα αρχικά μετατρέπονται από σειριακή σε παράλληλη διάταξη μέσω ενός *S/P converter*. Κάθε παράλληλο κανάλι δεδομένων αντιστοιχίζεται σε ένα φέρον σήμα. Σε κάθε κανάλι εφαρμόζεται κατάλληλο σχήμα διαμόρφωσης και προκύπτει το αντίστοιχο σύμβολο. Έπειτα στο προκύπτον διάνυσμα συμβόλων χρησιμοποιείται ο *IDFT* ο οποίος μετασχηματίζει το σήμα από το πεδίο της συχνότητας στο πεδίο του χρόνου. Σε κάθε συνιστώσα του διανύσματος εξόδου του *IDFT* προστίθεται το κυκλικό πρόθεμα και ακολουθεί η μετατροπή από παράλληλη σε σειριακή διάταξη μέσω *P/S converter* για την δημιουργία του OFDM συμβόλου. Στη συνέχεια ακολουθεί το στάδιο της *δειγματοληψίας* και η *παραγωγή του σήματος βασικής ζώνης* το οποίο θα μεταφερθεί πάνω στη φέρουσα συχνότητα για εκπομπή στο ασύρματο μέσο. Ουσιαστικά λιοπόν, ένα OFDM σύμβολο είναι η υπέρθεση όλων των διαμορφωμένων υποφερουσών με την κάθε μία να αναλαμβάνει τη μετάδοση ενός συγκεκριμένου διαμορφωμένου συμβόλου πληροφορίας.

Η αντίστροφη διαδικασία εκτελείται στο δέκτη. Ο δέκτης συγκεντρώνει τα σειριακά δείγματα και απορρίπτει το κυκλικό πρόθεμα που είχε προστεθεί για προστασία από τη διασυμβολική παρεμβολή. Στη συνέχεια με χρήση ενός *S/P converter* παράγεται το διάνυσμα εισόδου του *DFT* ο οποίος αποδιαμορφώνει όλα τα υποκανάλια και μετασχηματίζει το σήμα στο πεδίο της συχνότητας. Έπειτα πραγματοποιείται αρχικά εκτίμηση των συνθηκών μετάδοσης του κάθε υποκαναλιού και ακολουθεί η κατάλληλη αντιστάθμιση με σκοπό τη φώραση του λαμβανόμενου συμβόλου.

3.3.1 Πλεονεκτήματα της OFDM

Η OFDM αποτελεί την καταλληλότερη τεχνική διαμόρφωσης για τη μετάδοση υψηλού ρυθμού δεδομένων και προτιμάται τόσο από ενσύρματα (ADSL) όσο και από ασύρματα συστήματα (π.χ. WLANs). Ο 3GPP για το LTE πρότυπο υιοθέτησε την OFDM τεχνική καθώς αποτελεί μονόδρομο συγκριτικά με τις προϋπάρχουσες τεχνολογίες για την επίτευξη των αυστηρών προδιαγραφών που τίθενται από το IMT-Advanced. Τα βασικά πλεονεκτήματα που συνετέλεσαν στην επιλογή αυτή συνοψίζονται ως:

➤ **Αποδοτική διαχείριση του φάσματος**

Χάρη στην ιδιότητα της ορθογωνιότητας δεν παρουσιάζεται η ανάγκη ύπαρξης αποστάσεων ασφαλείας μεταξύ των υποκαναλιών. Οι υποφορείς μπορούν πλέον να επικαλύπτονται επιφέροντας σημαντική εξοικονόμηση πολύτιμου φάσματος.

➤ **Υποστήριξη φασματικής ευελιξίας**

Η τεχνική OFDM παρέχει τη δυνατότητα διαμόρφωσης του φάσματος μέσα από τη μεταβολή του αριθμού των υποφερουσών που χρησιμοποιούνται για τη μετάδοση της πληροφορίας. Το χαρακτηριστικό αυτό συνεπάγεται την ύπαρξη καναλιών διαφορετικού εύρους ζώνης ανάλογα με τις εκάστοτε απαιτήσεις της μετάδοσης.

➤ **Υποστήριξη τεχνικών *adaptive power* και *bit allocation***

Ανάλογα με το λόγο SNR που διαμορφώνεται σε κάθε υποκανάλι μπορούμε να μεταβάλλουμε τις παραμέτρους της μετάδοσης όπως την εκπεμπόμενη ισχύ P_R και να επιλέξουμε διαφορετικά σχήματα διαμόρφωσης καθορίζοντας τον αριθμό των bits ανά σύμβολο που αποστέλλονται από αυτό. Αν για παράδειγμα το κανάλι εμφανίζει χαμηλό SNR έχουμε την δυνατότητα να χρησιμοποιήσουμε μικρότερα σχήματα διαμόρφωσης όπως QPSK τα οποία είναι ανθεκτικά στο θόρυβο, εγγυώνται χαμηλό BER και εξασφαλίζουν αξιοπιστία στη μετάδοση. Αντίθετα σε ένα κανάλι υψηλού SNR αξιοποιούμε τις δυνατότητες υψηλότερων σχημάτων διαμόρφωσης όπως 16-QAM επιτυγχάνοντας μεγάλους ρυθμούς μετάδοσης εφόσον οι συνθήκες μας το επιτρέπουν. Η διαδικασία αυτή ονομάζεται **adaptive power** και **bit allocation** και μας παρέχει τη δυνατότητα μεταβολής του ρυθμού μετάδοσης των δεδομένων.

➤ **Προστασία έναντι της διασυμβολικής παρεμβολής (ISI)**

Η διαίρεση του συνολικού φάσματος ενός wideband σήματος σε έναν μεγάλο αριθμό από υποκανάλια αυξάνει τη διάρκεια του συμβόλου έναντι της χρονικής διασποράς του υποκαναλιού. Παράλληλα το εύρος ζώνης κάθε υποφορέα είναι αρκετά περιορισμένο με αποτέλεσμα η απόκριση της συχνότητάς του να θεωρείται σταθερή. Οι συνθήκες αυτές σε συνδυασμό με την ιδιότητα της ορθογωνιότητας εξασφαλίζουν ότι η διασυμβολική παρεμβολή διατηρείται σε

αρκετά χαμηλά και επιτρεπτά όρια για την ασφαλή και αποτελεσματική λειτουργία του συστήματος. Η προστασία από την διασυμβολική παρεμβολή και η παράλληλη μετάδοση ροών δεδομένων από το σύνολο των υποφορέων καθιστούν την τεχνολογία OFDM ιδανική για εφαρμογές όπου απαιτούνται υψηλοί ρυθμοί μετάδοσης όπως συμβαίνει στην περίπτωση του LTE.

➤ **Μειωμένη πολυπλοκότητα της αρχιτεκτονικής του δέκτη**

Τα συστήματα διαμόρφωσης μονής φέρουσας είναι ιδιαίτερα ευαίσθητα στην παρουσία διασυμβολικής παρεμβολής είτε επειδή το κανάλι είναι συχνотικά επιλεκτικό είτε γιατί η αύξηση του ρυθμού μετάδοσης έχει ως συνέπεια η διάρκεια του συμβόλου να είναι συγκρίσιμη με τη χρονική διασπορά του καναλιού. Υπό αυτές τις συνθήκες μετάδοσης, η εκτίμηση του καναλιού, η ισοστάθμιση και τελικώς η φώραση του λαμβανόμενου συμβόλου απαιτεί αρκετά πολύπλοκη υλοποίηση του δέκτη. Με την OFDM τεχνική ο δέκτης χαρακτηρίζεται από σημαντικά απλούστερη αρχιτεκτονική αφού η διασυμβολική παρεμβολή είναι αισθητά μικρότερη, το BER κυμαίνεται σε επιτρεπτά επίπεδα και η διαδικασία ανίχνευσης της μεταδιδόμενης πληροφορίας καθίσταται ευκολότερη.

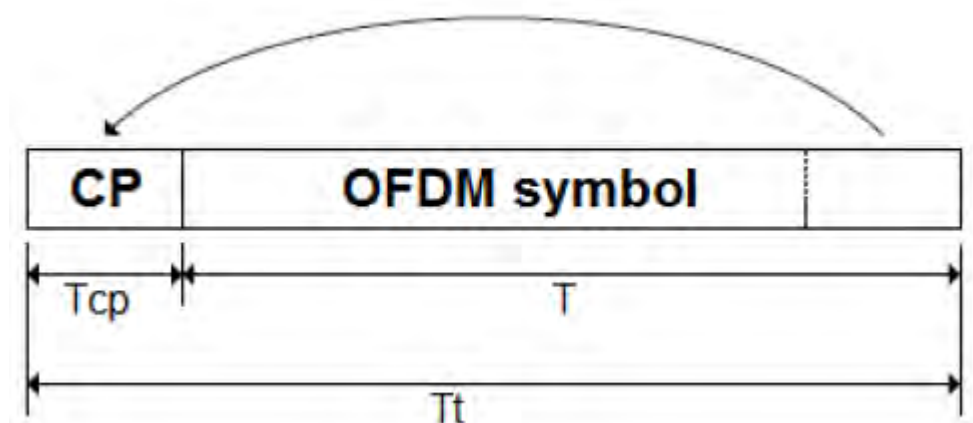
➤ **Υψηλή απόδοση**

Η OFDM αποτελεί μία αποδοτική υπολογιστική τεχνική χάρη στη χρήση του αλγορίθμου FFT και IFFT ο οποίος χαρακτηρίζεται από τη μεγάλη ταχύτητα λειτουργίας του και τη μειωμένη πολυπλοκότητα των εκτελούμενων πράξεων.

3.3.2 Κυκλικό πρόθεμα (Cyclic prefix - CP)

Η κρουστική απόκριση του ασύρματου μέσου και το φαινόμενο της πολυόδευσης αποτελούν τις δύο αιτίες εμφάνισης διασυμβολικής παρεμβολής. Στο OFDM σύστημα λόγω της κίνησης του χρήστη η διασυμβολική παρεμβολή επιφέρει την απώλεια της ορθογωνιότητας με αποτέλεσμα να προκύπτει παρεμβολή μεταξύ των υποφορέων (ICI). Προκειμένου να εξαλείψουμε την ISI και κατ'επέκταση την ICI εισάγουμε την έννοια του κυκλικού προθέματος (cyclic prefix - **CP**).

Ως κυκλικό πρόθεμα ορίζουμε το αντίγραφο του τελευταίου μέρους του OFDM συμβόλου το οποίο τοποθετούμε μπροστά από το εκπεμπόμενο σύμβολο, εξ'ού και η ονομασία "κυκλικό".



Σχήμα 3.6: Δημιουργία κυκλικού προθέματος OFDM συμβόλου

Ο ρόλος του κυκλικού προθέματος είναι διττός. Αρχικά συμβάλλει στην εξάλειψη της διασυμβολικής παρεμβολής λειτουργώντας ως διάστημα προστασίας (**guard interval**) μεταξύ δύο διαδοχικών OFDM συμβόλων. Η διάρκειά του είναι τουλάχιστον ίση με τη χρονική διασπορά του καναλιού και ως εκ τούτου διασφαλίζεται η ορθογωνιότητα των υποφορέων, ιδιότητα καθοριστική για την επιτυχημένη λειτουργία του OFDM συστήματος, και κατά συνέπεια απαλείφεται η παρεμβολή ICI.

Επιπλέον με την προσθήκη κυκλικού προθέματος η γραμμική συνέλιξη ανάμεσα στο μεταδιδόμενο σήμα και την κρουστική απόκριση του καναλιού μετατρέπεται σε κυκλική. Η **κυκλική συνέλιξη** μετασχηματίζεται πολύ αποτελεσματικά μέσω του FFT σε μία διαδικασία πολλαπλασιασμού στο πεδίο της συχνότητας.

Κατανοούμε επομένως ότι η διάρκεια του κυκλικού προθέματος αποτελεί κομβικής σημασίας σχεδιαστική παράμετρο και καθορίζει τη απόδοση λειτουργίας του OFDM συστήματος. Από τη μία οπτική το μήκος του πρέπει να είναι επαρκές και συγκρίσιμο με την χρονική διασπορά του ασύρματου μέσου ώστε να διατηρείται η ISI σε αποδεκτό επίπεδο. Όμως η μεταβαλλόμενη φύση του καναλιού, οι συνθήκες του οποίου διαφοροποιούνται ως με το περιβάλλον διάδοσης (αστικό, υπεραστικό, αγροτικό), επιτάσσουν διαφορετικό σχεδιασμό ανάλογα με την τιμή του. Θα πρέπει λοιπόν να βρεθεί μία μέση λύση για την υποστήριξη όλων αυτών των περιστάσεων.

Από την άλλη, το κυκλικό πρόθεμα δεν μεταφέρει κάποια χρήσιμη πληροφορία, χρησιμοποιείται ως τεχνική προστασίας της μετάδοσης και αφαιρείται από το δέκτη μετά τη λήψη του OFDM συμβόλου. Αυτό σημαίνει ότι το μέγεθός του θα πρέπει να καταλαμβάνει όσο το δυνατόν μικρότερο ποσοστό σε σχέση με το μέγεθος του OFDM συμβόλου προκειμένου να επιτυγχάνεται υψηλή φασματική απόδοση και throughput και να ελαχιστοποιείται το overhead του συστήματος.

Πρόκειται επομένως για έναν συμβιβασμό ανάμεσα στο ποσοστό εξάλειψης της διασυμβολικής παρεμβολής και της συνολικής απόδοσης του συστήματος. Το LTE έχει σχεδιαστεί να υποστηρίζει διαφορετικά περιβάλλοντα διάδοσης και ένα μεγάλο εύρος ταχυτήτων κίνησης του χρήστη από χαμηλές μέχρι υπερυψηλές. Το πρότυπο ορίζει τρεις διαφορετικές τιμές για το κυκλικό πρόθεμα σε συνδυασμό με τη φασματική απόσταση Δf των υποφορέων του OFDM.

Για $\Delta f = 15\text{kHz}$ ορίζονται το κανονικό (**normal**) και το εκτεταμένο (**extended**) κυκλικό πρόθεμα με τιμές **4.7μs** και **16.6μs** αντίστοιχα.

Για $\Delta f = 7.5\text{kHz}$ (για χρήση μόνο σε υπηρεσίες **multicast / broadcast**) ορίζεται το **εκτεταμένο** κυκλικό πρόθεμα με τιμή **33μs**.

Configuration	CP value (μs)	Subcarrier spacing (Δf) (kHz)	Number of subcarriers per resource block	Number of symbols per resource block
Normal cyclic prefix	4.7	15	12	7
Extended cyclic prefix	16.6	15	12	6
Extended cyclic prefix	33	7.5	24	3

Πίνακας 3.1: Προδιαγραφές κανονικού και εκτεταμένου κυκλικού προθέματος

Το LTE χρησιμοποιεί το κανονικό κυκλικό πρόθεμα σε αστικά και ημιαστικά περιβάλλοντα. Η τιμή **4.7μs** αντιστοιχεί σε μία διαφορά απόστασης μεταξύ των μεγαλύτερων και μικρότερων διαδρομών του σήματος περίπου **1.4km** ενώ το overhead που εισάγει είναι της τάξης του **7%** σε σχέση με τη διάρκεια 66.7μs του OFDM συμβόλου. Σε αγροτικά περιβάλλοντα και ανοιχτές περιοχές χρησιμοποιείται το εκτεταμένο κυκλικό πρόθεμα με διάρκεια **16.6μs** που ισοδυναμεί με το $\frac{1}{4}$ της διάρκειας του συμβόλου.

3.3.3 Κρίσιμοι παράγοντες σχεδίασης στο LTE

Το LTE πρότυπο ορίζει φασματική απόσταση $\Delta f = 15\text{kHz}$ μεταξύ των υποφορέων και χρονική διάρκεια του OFDM συμβόλου $T = 66.7\mu\text{s}$. Οι παράμετροι Δf και T συνδέονται αφού $\Delta f = T^{-1}$ και είναι πολύ σημαντικές για την απόδοση και την εύρυθμη λειτουργία του συστήματος. Αυτό συνεπάγεται την ανάγκη προσεκτικής μελέτης τους καθώς οι τιμές τους δεν μπορούν να οριστούν με αυθαίρετο τρόπο.

Αρχικά η παράμετρος Δf εγγυάται την ορθογωνιότητα των υποφορέων του OFDM και προκύπτει από τη διαίρεση του φάσματος W του καναλιού σε k υποκανάλια. Όσο

αυξάνεται η τιμή του k το Δf μειώνεται περιορίζοντας περαιτέρω το εύρος ζώνης του κάθε υποκαναλιού. Ένα αρκετά στενοζωνικό κανάλι χαρακτηρίζεται από σταθερή απόκριση συχνότητας και ικανοποιεί τη σχέση $C(f_k) \approx C_k$. Ωστόσο το εύρος ζώνης δεν επιτρέπεται να γίνει αυθαίρετα μικρό. Υπάρχει ένα κατώτατο όριο ως προς την τιμή του το οποίο καθορίζεται από το φαινόμενο Doppler. Το φαινόμενο Doppler οφείλεται στην κίνηση του χρήστη και προκαλεί διολίσθηση της συχνότητας των υποφερόντων σημάτων. Εξαιτίας της ολίσθησης η ορθογωνιότητα παύει να ισχύει και αναπτύσσεται παρεμβολή ICI υποβαθμίζοντας την απόδοση του συστήματος. Όσο αυξάνει η ταχύτητα κίνησης το φαινόμενο εντείνεται και η διολίσθηση αυξάνει περαιτέρω. Μετά από ένα σημείο η παρεμβολή μεταξύ των υποφορέων έχει υπερβεί τα επιτρεπόμενα όρια και καθίσταται πλέον αδύνατη η διάκριση των υποφερουσών και η ανάκτηση της πληροφορίας που μεταφέρουν.

Για να διατηρείται η παρεμβολή ελεγχόμενη και σε αποδεκτό επίπεδο πρέπει η μετατόπιση Doppler να είναι πολύ μικρότερη της φασματικής απόστασης Δf . Το κριτήριο επιλογής της τιμής της παραμέτρου Δf προκύπτει από τη συνθήκη 3.4:

$$\Delta f \gg f_D \quad (3.4)$$

όπου:

f_D : η μετατόπιση Doppler

Για ταχύτητα κίνησης του χρήστη $u = 350\text{km}$ και μέγιστη φέρουσα συχνότητα $f_c = 3.5\text{GHz}$ η μετατόπιση Doppler f_D υπολογίζεται στο 1.1kHz . Με $\Delta f = 15\text{kHz}$ προκύπτει ότι το f_D αποτελεί μόλις το **7%** της φασματικής απόστασης ικανοποιώντας την συνθήκη 3.4.

Η δεύτερη σημαντική παράμετρος είναι η χρονική διάρκεια T του συμβόλου. Η συνθήκη η οποία εγγυάται την προστασία έναντι τη διασυμβολικής παρεμβολής είναι η εξής:

$$T \gg \tau \quad (3.5)$$

όπου:

τ : χρονική διασπορά του καναλιού

Εφόσον $\Delta f = T^{-1}$ συνεπάγεται ότι $T = 1/\Delta f = 66.7\mu\text{s}$ ενώ η παράμετρος τ αντιστοιχεί στο κανονικό κυκλικό προθέμα και ισούται με $4.7\mu\text{s}$. Με βάση τις τιμές αυτές προκύπτει ότι η χρονική διασπορά του καναλιού αποτελεί το **7%** της διάρκειας του συμβόλου αποτέλεσμα το οποίο ικανοποιεί τη συνθήκη 3.5.

Οι παράμετροι Δf και T είναι άρρηκτα συνδεδεμένες και καθορίζουν το ποσοστό των παρεμβολών ISI και ICI. Εάν το Δf είναι αρκετά μικρότερο των 15kHz το σύστημα

είναι επιρρεπές στην παρεμβολή μεταξύ των υποφορέων (**ICI**) ενώ αν επιλεγεί μεγαλύτερο επιφέρει σημαντική αύξηση της διασυμβολικής παρεμβολής (**ISI**).

3.3.4 Τεχνολογία OFDMA (Orthogonal Frequency Division Multiple Access)

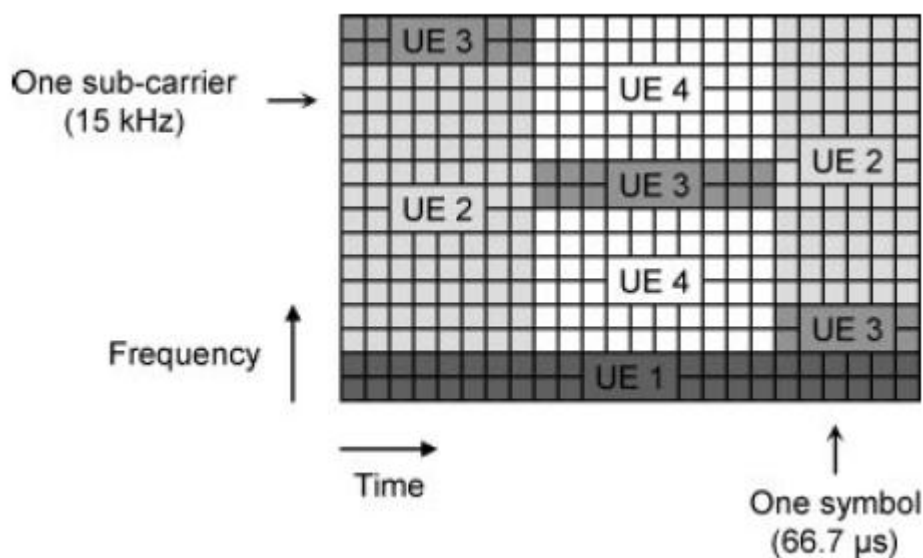
Το LTE χρησιμοποιεί την τεχνολογία **OFDMA** για τη μετάδοση των δεδομένων στην κατερχόμενη ζεύξη. Η OFDMA προκύπτει από την τεχνική OFDM ωστόσο διακρίνεται από την τελευταία καθώς υπάρχει μία ειδοποιός διαφορά. Η OFDM είναι μία τεχνική διαμόρφωσης πολλαπλών ορθογώνιων υποφερόντων σημάτων ενώ η OFDMA είναι μία τεχνική πολλαπλής πρόσβασης που βασίζεται στην OFDM αποσκοπώντας στην ταυτόχρονη μετάδοση με αποδέκτες πολλούς χρήστες μέσω του διαμοιρασμού των διαθέσιμων πόρων του σταθμού βάσης.

Η φιλοσοφία της OFDMA είναι η πολλαπλή προσπέλαση δηλαδή η κοινή χρήση του ίδιου μέσου από πολλούς συνδρομητές. Η πολλαπλή πρόσβαση επιτυγχάνεται με την ανάθεση υποσυνόλων των διαθέσιμων υποκαναλιών, τα οποία προκύπτουν από την OFDM, σε μεμονωμένους χρήστες. Στο OFDMA σύστημα ο σταθμός βάσης διαμοιράζει με δυναμικό τρόπο τους πόρους μεταξύ των συσκευών που εξυπηρετεί σε μία συγκεκριμένη κυψέλη ακολουθώντας κανόνες προτεραιότητας. Η κατανομή των πόρων πραγματοποιείται στο πεδίο του χρόνου με τη μετάδοση σε διαφορετικές χρονοθυρίδες και στο πεδίο της συχνότητας με τη διαχείριση των διαφορετικών ομάδων υποφορέων.

Ο σταθμός βάσης eNodeB παρακολουθεί και ελέγχει ανά πάσα χρονική στιγμή τον αριθμό των ενεργών χρηστών, τις υπηρεσίες που εκτελούν, τη μεταβολή των απαιτήσεων σε πόρους του συστήματος, τις επικρατούσες συνθήκες καναλιού για κάθε συσκευή (SNR) και αποφασίζει τον τρόπο ανάθεσης των υποκαναλιών μεταξύ των συνδρομητών καθορίζοντας έτσι και το ρυθμό μετάδοσης των δεδομένων τους.

Για την εξασφάλιση της μέγιστης απόδοσης ο σταθμός βάσης χρησιμοποιεί την τεχνική προσαρμογής ζεύξης (**link adaptation**) σύμφωνα με την οποία υπολογίζει τις συνθήκες του εκάστοτε καναλιού με βάση μετρήσεις που λαμβάνει από τις συσκευές των χρηστών και στη συνέχεια αναθέτει περισσότερους πόρους στους χρήστες με υψηλό SNR και κατανέμει τα υποκανάλια με τέτοιο τρόπο ώστε να διασφαλίζεται η όσο το δυνατόν πιο σταθερή απόκριση συχνότητας και η λήψη ισχυρού σήματος.

Στο σχήμα 3.7 απεικονίζεται ένα παράδειγμα διαχείρισης και κατανομής των πόρων του σταθμού βάσης με τη χρήση της τεχνικής OFDMA.



Σχήμα 3.7: Κατανομή των πόρων με χρήση της τεχνικής OFDMA

Ο σταθμός βάσης προγραμματίζει και αναθέτει δυναμικά τους πόρους σε τέσσερις συσκευές ταυτόχρονα με βάση τις επικοινωνιακές τους ανάγκες αξιολογώντας την κατάσταση του κάθε καναλιού στο χρόνο και τη συχνότητα για κάθε έναν από τους χρήστες.

Παρατηρούμε ότι ο **UE₁** έχει ανάγκη από χαμηλό και ταυτόχρονα σταθερό ρυθμό μετάδοσης. Έτσι ο σταθμός βάσης καταχωρεί μόνο δύο υποκανάλια τα οποία όμως παραμένουν δεσμευμένα για όλη τη χρονική διάρκεια που απαιτεί η υπηρεσία του χρήστη.

Ο **UE₂** λαμβάνει μία ροή πακέτων δεδομένων από μία non real time εφαρμογή. Η ανάγκη για υψηλό ρυθμό μετάδοσης οδηγεί τον eNodeB στην εκχώρηση ενός μεγάλου αριθμού υποφερόντων με χρονική διαφορά μεταξύ των εκχωρήσεων λόγω του ότι τα δεδομένα λαμβάνονται υπό μορφή ριπών.

Για τους χρήστες **UE₃** και **UE₄** ο σταθμός βάσης παρακολουθεί ποια υποκανάλια είναι συχνотικά επιλεκτικά και υποφέρουν από υψηλή εξασθένιση και κατανέμει τους πόρους στους οποίους επιτυγχάνεται αποδεκτό SNR και υψηλό QoS για τις υπηρεσίες τους.

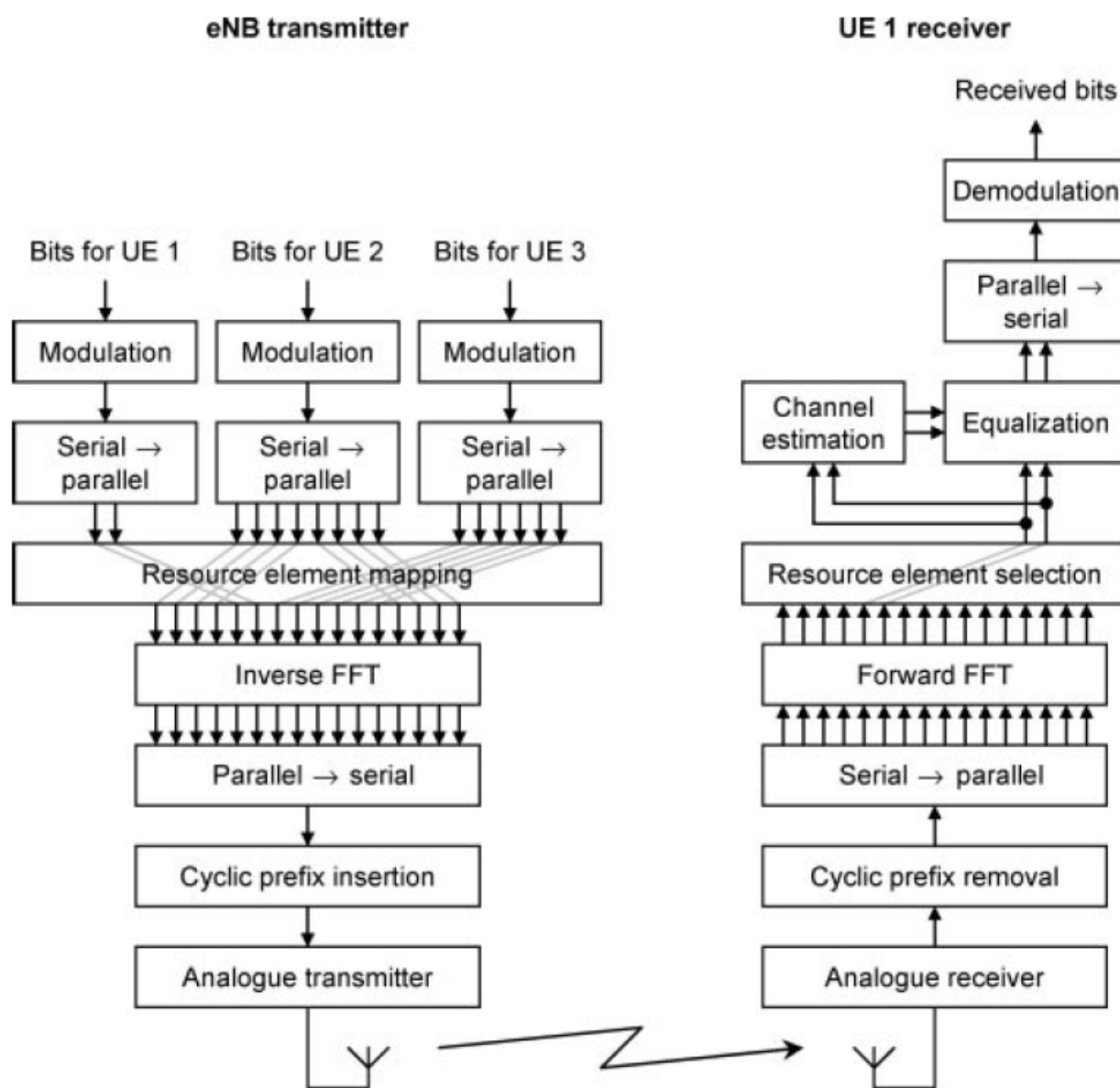
Στην περίπτωση του **UE₄** έχουμε εκχώρηση δύο διαφορετικών ομάδων υποκαναλιών για μεγάλο χρονικό διάστημα χρήσης. Μεταξύ των ομάδων παρεμβάλλονται δύο υποφέρουσες οι οποίες λόγω ισχυρής εξασθένισης αποκλείστηκαν από την κατανομή.

Στην περίπτωση του **UE₃** ο eNodeB εφαρμόζει δυναμική καταχώρηση αναθέτοντας μόνο τα υποκανάλια όπου ο χρήστη λαμβάνει ισχυρό σήμα και τροποποιεί την

κατανομή στη συχνότητα σύμφωνα τον τρόπο αλλαγής μεταβολής των συνθηκών μετάδοσης.

Η OFDMA τεχνική παρέχει μεγάλη ευελιξία στη διαχείριση των περιορισμένων πόρων του σταθμού βάσης και συμβάλλει στην αντιμετώπιση των διαρκώς μεταβαλλόμενων συνθηκών μετάδοσης. Ένα κανάλι το οποίο υποφέρει από έντονα φαινόμενα διαλείψεων και κρίνεται ακατάλληλο για κάποιον χρήστη προσφέρεται για υψηλούς ρυθμούς δεδομένων για κάποιον άλλο.

Η δομή ενός OFDMA πομπού και δέκτη απεικονίζεται στο σχήμα 3.8.



Σχήμα 3.8: OFDMA πομπός και δέκτης

Ο σταθμός βάσης μέσω της OFDMA μεταδίδει ταυτόχρονα δεδομένα προς τρεις συσκευές ορίζοντας τρία διαφορετικά υποσύνολα υποφορέων. Κάθε συσκευή μέσα

από την αποκωδικοποίηση πληροφοριών ελέγχου γνωρίζει σε ποια υποκανάλια θα εντοπίσει τα δεδομένα της.

3.3.4.1 Τεχνικές καταχώρησης πόρων

Οι τεχνικές καταχώρησης πόρων έχουν αναπτυχθεί με σκοπό τη βέλτιστη εκμετάλλευση του περιορισμένου φάσματος ώστε να επιτυγχάνεται η ελαχιστοποίηση και η προστασία από τις παρεμβολές γειτονικών υποκαναλιών και κυψελών λόγω της επαναχρησιμοποίησης των συχνοτήτων.

Το LTE πρότυπο υποστηρίζει τρεις διαφορετικούς τύπους καταχώρησης πόρων.

- **Στατικός τύπος**

Ο σταθμός βάσης πραγματοποιεί εκτίμηση των συνθηκών του καναλιού βασιζόμενος στις μετρήσεις που λαμβάνει από τη συσκευή (CQI, PMI, RI) και κατανέμει τους πόρους μία φορά χωρίς να υφίσταται περαιτέρω ανακατανομή.

- **Ημιστατικός τύπος**

Ο τύπος αυτός χαρακτηρίζεται και ως υβριδικός. Ο σταθμός βάσης ελέγχει σε τακτά χρονικά διαστήματα την τηλεπικοινωνιακή κίνηση και τον τρόπο μεταβολής της και προβαίνει σε αλλαγή του καταμερισμού μόνο αν κριθεί απαραίτητο.

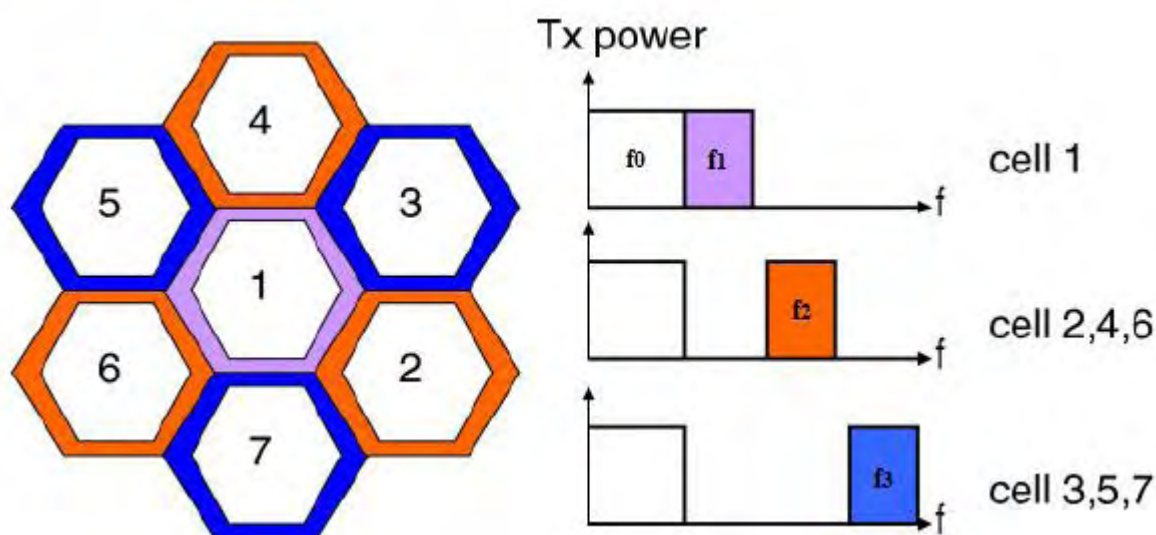
- **Δυναμικός τύπος**

Ο δυναμικός τύπος συμβάλλει στην επίλυση των προβλημάτων που οφείλονται στην μεταβαλλόμενη συνδρομητική κίνηση, την ανομοιομορφία της χωρητικότητας και την πολυεπίπεδη σχεδίαση των κυτταρικών δικτύων. Ο σταθμός βάσης βρίσκεται σε διαρκή επικοινωνία και ανακατανέμει δυναμικά τους πόρους στους συνδρομητές προσαρμοζόμενος στις επικοινωνιακές ανάγκες και απαιτήσεις τους.

3.3.4.2 Επαναχρησιμοποίηση συχνοτήτων

Το διαθέσιμο φάσμα ενός δικτύου κινητών επικοινωνιών είναι αρκετά περιορισμένο. Η βασική ιδέα για την εξυπηρέτηση της συνολικής χωρητικότητας του έγκειται στη φιλοσοφία επαναχρησιμοποίησης των πόρων. Η επαναχρησιμοποίηση πρέπει να διέπεται από αυστηρούς κανόνες ώστε να διατηρούνται σε αποδεκτό επίπεδο οι παρεμβολές λόγω της χρήσης των ίδιων συχνοτήτων μέσα σε μία ευρεία γεωγραφική περιοχή και να διασφαλίζεται η εύρυθμη λειτουργία και η υψηλή απόδοση του δικτύου.

Χάρη στην τεχνολογία OFDMA επιτυγχάνεται πολύ μεγαλύτερο ποσοστό επαναχρησιμοποίησης, αποδοτικότερη διαχείριση των πόρων και μείωση των παρεμβολών λόγω συνύπαρξης γειτονικών κυττάρων. Η τεχνική που χρησιμοποιείται στο LTE ονομάζεται κλασματική επαναχρησιμοποίηση συχνότητας (**fractional frequency re-use**). Σύμφωνα με την τεχνική αυτή ο συνολικός αριθμός των υποκαναλιών διαιρείται σε υποσύνολα. Όλες οι κυψέλες στο κέντρο τους χρησιμοποιούν το ίδιο υποσύνολο υποφορέων χωρίς να υπάρχει πρόβλημα παρεμβολών καθώς η συσκευή λαμβάνει ισχυρό σήμα λόγω της μικρής απόστασης από το σταθμό βάσης. Για τη μείωση των παρεμβολών και την εξυπηρέτηση των απομακρυσμένων συσκευών που κινούνται στα όρια του κυττάρου υφίσταται συντονισμός μεταξύ των κυττάρων (Inter Cell Interference Coordination - **ICIC**) ώστε να αποφεύγεται η ταυτόχρονη χρήση του ίδιου φάσματος συχνοτήτων στα άκρα γειτονικών κυψελών.



Σχήμα 3.9: Τεχνική fractional frequency re-use στο LTE

Στο σχήμα 3.9 εφαρμόζουμε την τεχνική fractional frequency re-use και δημιουργούμε τέσσερα υποσύνολα υποκαναλιών f_0 , f_1 , f_2 και f_3 . Το υποσύνολο f_0 χρησιμοποιείται από όλες τις κυψέλες στο κέντρο τους με **100%** ποσοστό επαναχρησιμοποίησης. Τα εναπομείναντα υποσύνολα f_1 , f_2 και f_3 καλύπτουν τις επικοινωνιακές ανάγκες των συνδρομητών στα άκρα του αντίστοιχου κυττάρου και κατανέμονται με τέτοιο τρόπο ώστε γειτονικά κύτταρα να χρησιμοποιούν διαφορετικά υποσύνολα. Ο παράγοντας επαναχρησιμοποίησης των f_1 , f_2 και f_3 είναι **33%**. Η τεχνική fractional frequency re-use σε συνδυασμό με το συντονισμό μεταξύ των κυψελών (ICIC) επιφέρουν έναν μέσο συντελεστή επαναχρησιμοποίησης περίπου **67%** για το σύστημα LTE.

3.3.4.3 Πλεονεκτήματα της OFDMA

- Αποτελεσματική διαχείριση του εύρους ζώνης και δυναμική ανάθεση των πόρων στο πεδίο του χρόνου και της συχνότητας.
- Υψηλή προσαρμοστικότητα στις μεταβολές του τηλεπικοινωνιακού φορτίου και στις απαιτήσεις μετάδοσης της εκάστοτε υπηρεσίας και εφαρμογής.
- Διασφάλιση υψηλής ποιότητας εξυπηρέτησης (QoS) και επίτευξη μέγιστης απόδοσης του συστήματος.
- Προστασία από παρεμβολές γειτονικών καναλιών που χρησιμοποιούνται από διαφορετικές συσκευές μέσα στο ίδιο κύτταρο εξυπηρέτησης.
- Ελαχιστοποίηση των παρεμβολών στα άκρα γειτονικών κυττάρων
- Μεγάλη ευελιξία στη διαχείριση καναλιών επιλεκτικής συχνότητας, ευαίσθητων σε φαινόμενα διαλείψεων και εξασθένησης χωρίς την απαίτηση αυξημένης πολυπλοκότητας του εξοπλισμού.

3.3.5 Τεχνολογία SC-FDM (Single Carrier – Frequency Division Multiplexing)

Το σημαντικότερο μειονέκτημα της τεχνικής OFDM είναι ο μεγάλος λόγος μέγιστης στιγμιαίας προς μέση τιμή ισχύος **PAPR** (Peak to Average Power Ratio) στο μεταδιδόμενο OFDM σήμα. Το OFDM σήμα προκύπτει από το άθροισμα k παράλληλων υποσημάτων. Όμως το κάθε υποσήμα διαθέτει τη δική του δυναμική περιοχή τιμών με αποτέλεσμα να προκαλούνται διακυμάνσεις στην ισχύ του εκπεμπόμενου σήματος. Στην περίπτωση δε που τύχει πολλά υποσήματα ταυτόχρονα να λαμβάνουν μεγάλες τιμές και οι υποφέρουσές τους να είναι συμφασικές τότε η στιγμιαία ισχύς εμφανίζεται πολύ μεγάλη σε σχέση με τη μέση ισχύ του σήματος.

Ένα σήμα με πολύ υψηλό PAPR ωθεί τον ενισχυτή ισχύος του σταθμού βάσης να λειτουργεί στην περιοχή του κόρου όπου εμφανίζει μη γραμμική συμπεριφορά. Οι μη γραμμικότητες που προκύπτουν προκαλούν παραμορφώσεις του φάσματος στο πεδίο της συχνότητας με συνέπεια τη διαρροή του σήματος σε γειτονικά υποκανάλια και την εμφάνιση παρεμβολών σε άλλους δέκτες.

Για την αντιμετώπιση του προβλήματος απαιτούνται ακριβοί ενισχυτές ισχύος των οποίων η λειτουργία να προσεγγίζει όσο το δυνατόν καλύτερα αυτή των γραμμικών

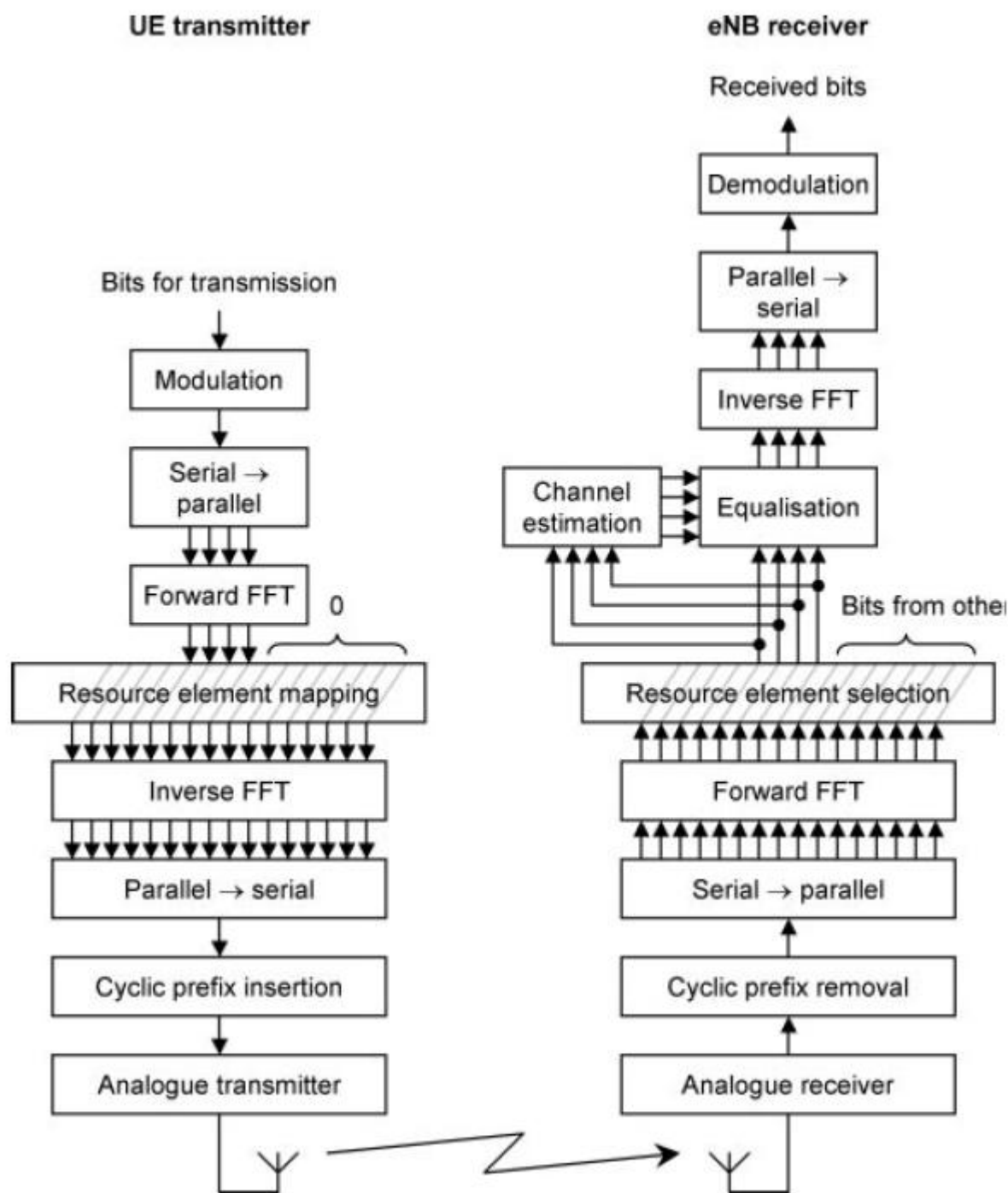
ενισχυτών. Η λύση αυτή είναι εφικτή και υλοποιείται στους σταθμούς βάσης όπου το κόστος δεν αποτελεί την πρώτη προτεραιότητα.

Γίνεται επομένως αντιληπτό ότι η χρήση της τεχνικής OFDMA κρίνεται ακατάλληλη για την ανερχόμενη ζεύξη. Αρχικά ο μεγάλος λόγος PAPR δεν συνάδει με τις προδιαγραφές για υψηλή ενεργειακή απόδοση εφόσον απαιτεί μεγάλη ενεργειακή κατανάλωση μειώνοντας δραστικά τη διάρκεια της μπαταρίας της συσκευής. Ακολούθως η λύση των ακριβών ενισχυτών δεν είναι εφαρμόσιμη στην περίπτωση της ανερχόμενης ζεύξης επειδή αυξάνει δυσανάλογα το κόστος κατασκευής των τερματικών.

Το LTE για την αποστολή των δεδομένων στο uplink εφαρμόζει την τεχνική SC-FDM (Single Carrier – Frequency Division Multiplexing). Στην **SC-FDM** δεν υφίσταται αντιστοιχία μία προ μία μεταξύ συμβόλων και υποφερουσών αλλά προηγείται μία ανάμιξη των συμβόλων πριν την αντιστοίχησή τους στα υποκανάλια.

Σκοπός είναι να βρεθεί ο συνδυασμός εκείνος για τον οποίο επιτυγχάνεται η ελάχιστη διακύμανση ισχύος του μεταδιδόμενου σήματος. Η ανάμιξη των συμβόλων δεν δημιουργεί κανένα πρόβλημα στο δέκτη αφού ο τελευταίος μπορεί εύκολα να τον αντιστρέψει και να ανακτήσει τα λαμβανόμενα σύμβολα. Η διαδικασία της ανάμιξης επιτελείται από έναν εμπρόσθιο FFT ο οποίος τοποθετείται ανάμεσα στον S/P converter και το Resource Element Mapping του SC-FDM πομπού. Η τεχνική αυτή ονομάζεται Discrete Fourier Transform Spread - Orthogonal Frequency Division Multiplexing (**DFTS-OFDM**).

Στην SC-FDM η συσκευή δεσμεύει μία ενιαία, συνεχόμενη περιοχή υποφορέων για τη μετάδοση των συμβόλων όπου το κάθε σύμβολο εξαπλώνεται σε όλο το διαθέσιμο αυτό φάσμα. Η ονομασία SC-FDM οφείλεται στο γεγονός ότι ο τρόπος μετάδοσης προσομοιώνει περισσότερο τη διαμόρφωση μονής φέρουσας (single carrier) και αντιτίθεται στη λειτουργία της τεχνικής OFDM. Ωστόσο η εξάπλωση της ισχύος της πληροφορίας σε όλο το εύρος ζώνης μειώνει τη μέση τιμή της ισχύος μετάδοσης, δημιουργεί ένα σήμα με χαμηλό PAPR και εγγυάται τη λειτουργία του ενισχυτή ισχύος της συσκευής στη γραμμική περιοχή εξαλείφοντας τις παρεμβολές ενδοδιαμόρφωσης που εμφανίζονται λόγω μη γραμμικότητας. Το σχήμα 3.10 παρουσιάζει την αρχιτεκτονική ενός SC-FDM πομπού και δέκτη.



Σχήμα 3.10: SC-FDM πομπός και δέκτης

Η τεχνική SC-FDM προσφέρει τα ίδια πλεονεκτήματα με την OFDM. Διατηρεί την ορθογωνιότητα μεταξύ πολλαπλών χρηστών στην ανερχόμενη ζεύξη, παρέχει προστασία από παρεμβολές λόγω πολυόδευσης του σήματος και διασφαλίζει χαμηλό PAPR. Ωστόσο επιδεικνύει υποδεέστερες επιδόσεις συγκριτικά με την OFDMA ενώ η δυνατότητα αποστολής μόνο προς έναν αποδέκτη, τον σταθμό βάσης, την καθιστά ακατάλληλη για χρήση στην κατερχόμενη ζεύξη όπου απαιτείται πολλαπλή πρόσβαση.

3.4 Συχνότητες λειτουργίας

Οι προδιαγραφές του 3GPP ορίζουν έναν μεγάλο αριθμό ζωνών συχνοτήτων για το πρότυπο του LTE. Στις βασικές απαιτήσεις του προτύπου περιλαμβάνεται η συμβατότητα και η απρόσκοπτη διασύνδεση και διαλειτουργικότητα με τα προϋπάρχοντα 3GPP και μη 3GPP συστήματα. Η επιδίωξη αυτή αντανακλάται μέσα από την υιοθέτηση περιοχών συχνοτήτων που χρησιμοποιούνται από προηγούμενα δίκτυα κινητών επικοινωνιών σε συνδυασμό με καινούριες ζώνες οι οποίες εντάχθηκαν για πρώτη φορά στο LTE.

Οι πίνακες 3.2 και 3.3 παραθέτουν τις αντίστοιχες FDD και TDD περιοχές συχνοτήτων που χρησιμοποιούνται από το LTE. Αναγράφεται η έκδοση όπου περιελήφθηκαν για πρώτη φορά και η γεωγραφική περιοχή χρήσης τους.

Band	Release	Uplink band (MHz)	Downlink band (MHz)	Main regions	Notes
1	R99	1920–1980	2110–2170	Europe, Asia, Africa	WCDMA
2	R99	1850–1910	1930–1990	Americas	GSM 1900, CDMA
3	R5	1710–1785	1805–1880	Europe, Asia, Africa	GSM 1800
4	R6	1710–1755	2110–2155	Americas	
5	R6	824–849	869–894	Americas	GSM 850, CDMA
6	–	–	–	–	Not used by LTE
7	R7	2500–2570	2620–2690	Europe	
8	R7	880–915	925–960	Europe, Asia, Africa	GSM 900
9	R7	1749.9–1784.9	1844.9–1879.9	Japan	
10	R7	1710–1770	2110–2170	Americas	
11	R8	1427.9–1447.9	1475.9–1495.9	Japan	
12	R8	699–716	729–746	USA	Digital dividend
13	R8	777–787	746–756	USA	Digital dividend
14	R8	788–798	758–768	USA	Digital dividend
15	–	–	–	–	Not used by 3GPP
16	–	–	–	–	Not used by 3GPP
17	R8	704–716	734–746	USA	Digital dividend
18	R9	815–830	860–875	Japan	
19	R9	830–845	875–890	Japan	
20	R9	832–862	791–821	Europe	Digital dividend
21	R9	1447.9–1462.9	1495.9–1510.9	Japan	
22	R10	3410–3490	3510–3590	Europe	
23	R10	2000–2020	2180–2200	North America	
24	R10	1626.5–1660.5	1525–1559	North America	
25	R10	1850–1915	1930–1995	Americas	

Πίνακας 3.2: FDD frequency bands

Band	Release	Frequency band (MHz)	Main regions
33	R99	1900–1920	Europe, Asia
34	R99	2010–2025	Europe, Asia
35	R99	1850–1910	Americas
36	R99	1930–1990	Americas
37	R99	1910–1930	Americas
38	R7	2570–2620	Europe
39	R8	1880–1920	China
40	R8	2300–2400	China
41	R10	2496–2690	USA
42	R10	3400–3600	Europe
43	R10	3600–3800	Europe

Πίνακας 3.3: TDD frequency bands

Οι 3GPP προδιαγραφές ορίζουν **25 ζώνες** για τον **FDD** τρόπο και **11** για τον **TDD**. Στον πίνακα 3.2 παρατηρούμε ότι οι ζώνες 12, 13, 14 και 17 στα 700MHz χρησιμοποιούνται στην Αμερική για παροχή υπηρεσιών αναλογικής τηλεόρασης όπως και οι ζώνες 7 και 20 των 800 και 2600MHz στην Ευρώπη αντίστοιχα. Επίσης αρκετές περιοχές συχνοτήτων του LTE είχαν ήδη εκχωρηθεί σε προϋπάρχοντα δίκτυα κινητών επικοινωνιών. Οι ζώνες 1, 3 και 8 χρησιμοποιούνται για τη λειτουργία του WCDMA, GSM1800 και GSM900 στην Ευρώπη ενώ οι ζώνες 2, 4 και 5 για τα GSM1900, CDMA και GSM850 στην Αμερική. Η ζώνη 6 δεν είναι διαθέσιμη στο LTE ενώ οι περιοχές 15 και 16 είναι δεσμευμένες από τον οργανισμό ITU.

Η φιλοσοφία του 3GPP αναφορικά με τις συχνότητες λειτουργίας του LTE οδήγησε στην ύπαρξη ενός μεγάλου αριθμού ζωνών με την κάθε χώρα να ορίζει διαφορετικά κανονιστικά πλαίσια που τις διέπουν. Το γεγονός αυτό συνετέλεσε ώστε διαφορετικές χώρες, περιοχές και φορείς εκμετάλλευσης και διαχείρισης δικτύων να χρησιμοποιούν διαφορετικές περιοχές συχνοτήτων. Το καθεστώς αυτό έχει αντίκτυπο στους κατασκευαστές τηλεπικοινωνιακού εξοπλισμού αφού κάθε LTE συσκευή πρέπει να είναι σε θέση να υποστηρίζει μεγάλο πλήθος από φέρουσες συχνότητες για να μπορεί να χρησιμοποιείται σε όσο το δυνατόν περισσότερες γεωγραφικές περιοχές στα πλαίσια της παγκόσμιας εξάπλωσης του LTE.

3.5 Τεχνική duplexing

Η δυνατότητα της ταυτόχρονης αποστολής και λήψης δεδομένων είναι βασικό χαρακτηριστικό των σύγχρονων δικτύων κινητών επικοινωνιών και υποστηρίζεται χάρη στην τεχνική **duplexing**. Η τεχνική αυτή διακρίνει τις μεταδόσεις ανάμεσα στη συσκευή και το σταθμό βάσης. Το LTE υποστηρίζει δύο τεχνικές duplexing:

- Τεχνική φασματικής διαίρεσης (Frequency Division Duplex - **FDD**)
- Τεχνική χρονικού διαμοιρασμού (Time Division Duplex - **TDD**)

Ο σταθμός βάσης και η συσκευή λειτουργούν και με τους δύο τρόπους αλλά χρησιμοποιούν μόνο έναν κάθε φορά.

3.5.1 Τεχνική φασματικής διαίρεσης (Frequency Division Duplex - **FDD**)

Σύμφωνα με την τεχνική της φασματικής διαίρεσης (**FDD**) στον κάθε συνδρομητή παραχωρούνται δύο ξεχωριστές ζώνες συχνοτήτων. Η μία ζώνη ονομάζεται άνω ή ανερχόμενη ζεύξη (**uplink**) και χρησιμοποιείται για την επικοινωνία της φορητής συσκευής με το σταθμό βάσης και η άλλη ζώνη ονομάζεται κάτω ή κατερχόμενη ζεύξη (**downlink**) για την επικοινωνία του σταθμού βάσης με τη φορητή συσκευή. Μεταξύ των δύο αυτών ζωνών συχνοτήτων παρεμβάλλεται μία ζώνη ασφαλείας (**guard band**) στο φάσμα για την απομόνωση του uplink και του downlink. Στην κάθε ζεύξη το κανάλι που χρησιμοποιεί ο χρήστης είναι μονής κατευθύνσεως.

Με την τεχνική FDD η συσκευή και ο σταθμός βάσης μπορούν μεταδίδουν και να λαμβάνουν δεδομένα την ίδια χρονική στιγμή. Για την επίτευξη της ταυτόχρονης αποστολής και λήψης πληροφοριών στην τεχνική FDD απαιτείται συσκευή που ονομάζεται **duplexer** στον εξοπλισμό του χρήστη και στο σταθμό βάσης.

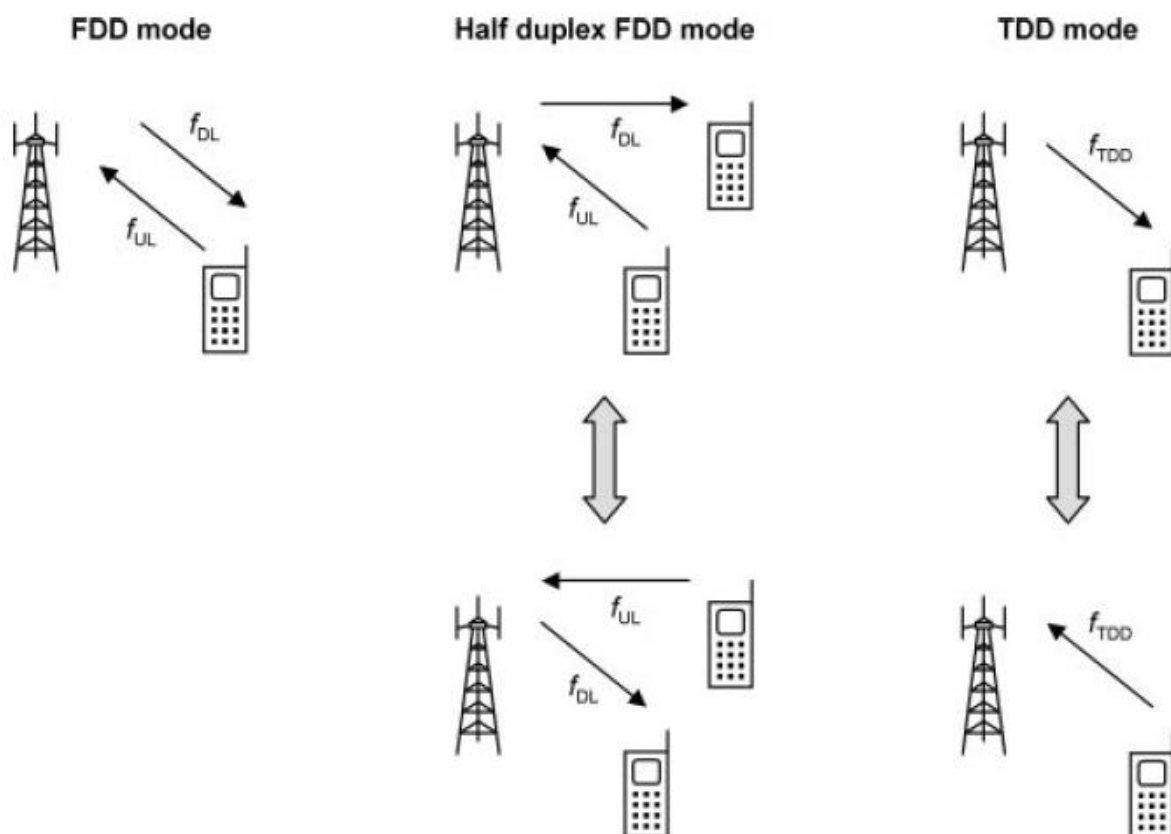
Στον FDD τρόπο το εύρος ζώνης της ανερχόμενης και κατερχόμενης ζεύξης είναι σταθερό και συνήθως ίδιο, γεγονός που την καθιστά κατάλληλη για υπηρεσίες όπως η μετάδοση φωνής όπου ο ρυθμός δεδομένων είναι σταθερός στο uplink και downlink.

Μία παραλλαγή της FDD είναι γνωστή ως **half duplex FDD**. Στην τεχνική half duplex FDD ο σταθμός βάσης εξακολουθεί να υποστηρίζει τη δυνατότητα ταυτόχρονης αποστολής και λήψης ωστόσο η συσκευή μπορεί να εκτελεί μόνο μία από τις δύο ενέργειες αφού δεν της παραχωρείται αποκλειστική συχνότητα για την ανερχόμενη ζεύξη.

3.5.2 Τεχνική χρονικού διαμοιρασμού (Time Division Duplex - TDD)

Στην τεχνική του χρονικού διαμοιρασμού (TDD) παραχωρείται μόνο μία συχνότητα για την επικοινωνία ανάμεσα στο σταθμό βάσης και τη συσκευή. Στην τεχνική TDD για την διάκριση μεταξύ της ανερχόμενης και κατερχόμενης ζεύξης χρησιμοποιείται ο χρόνος και πιο συγκεκριμένα οι **χρονοθυρίδες** (timeslots) αντί της συχνότητας που είχαμε στην FDD. Η τεχνική αυτή μπορεί να υλοποιηθεί και χωρίς τη χρήση των duplexers αρκεί μεταξύ των χρονοθυρίδων που χρησιμοποιούνται για εκπομπή και λήψη να εισάγουμε μία χρονική διαφορά η οποία βέβαια δεν γίνεται αντιληπτή από τον συνδρομητή.

Ο TDD τρόπος μετάδοσης παρέχει τη δυνατότητα ρύθμισης του χρόνου που αντιστοιχεί στην ανερχόμενη και κατερχόμενη ζεύξη. Το χαρακτηριστικό αυτό τον καθιστά ιδανικό για υπηρεσίες όπως η πλοήγηση στο Διαδίκτυο όπου υφίσταται ανισοκατανομή των δεδομένων του uplink και του downlink και απαίτηση για διαφορετικούς ρυθμούς μετάδοσης. Ωστόσο επειδή η τεχνική TDD είναι ευάλωτη σε παρεμβολές που προκαλούνται από τη λειτουργία γειτονικών σταθμών βάσης απαιτεί υψηλή ακρίβεια συγχρονισμού στο πεδίο του χρόνου.



Σχήμα 3.11: FDD, TDD και half duplex FDD λειτουργία στο LTE

3.6 Εύρος ζώνης καναλιού

Σύμφωνα με τις προδιαγραφές του IMT-Advanced απαιτείται από το LTE πρότυπο να παρέχει μεγάλη ευελιξία φάσματος. Η απαίτηση αυτή επιτυγχάνεται με τη χρήση της τεχνικής OFDM σύμφωνα με την οποία το διαθέσιμο φάσμα μετάδοσης διαιρείται σε έναν αριθμό από στενοζωνικά υποκανάλια. Έτσι το LTE υποστηρίζει την ύπαρξη καναλιών με εύρος ζώνης που κυμαίνεται από **1.4 έως 20MHz** με βήμα **180kHz**.

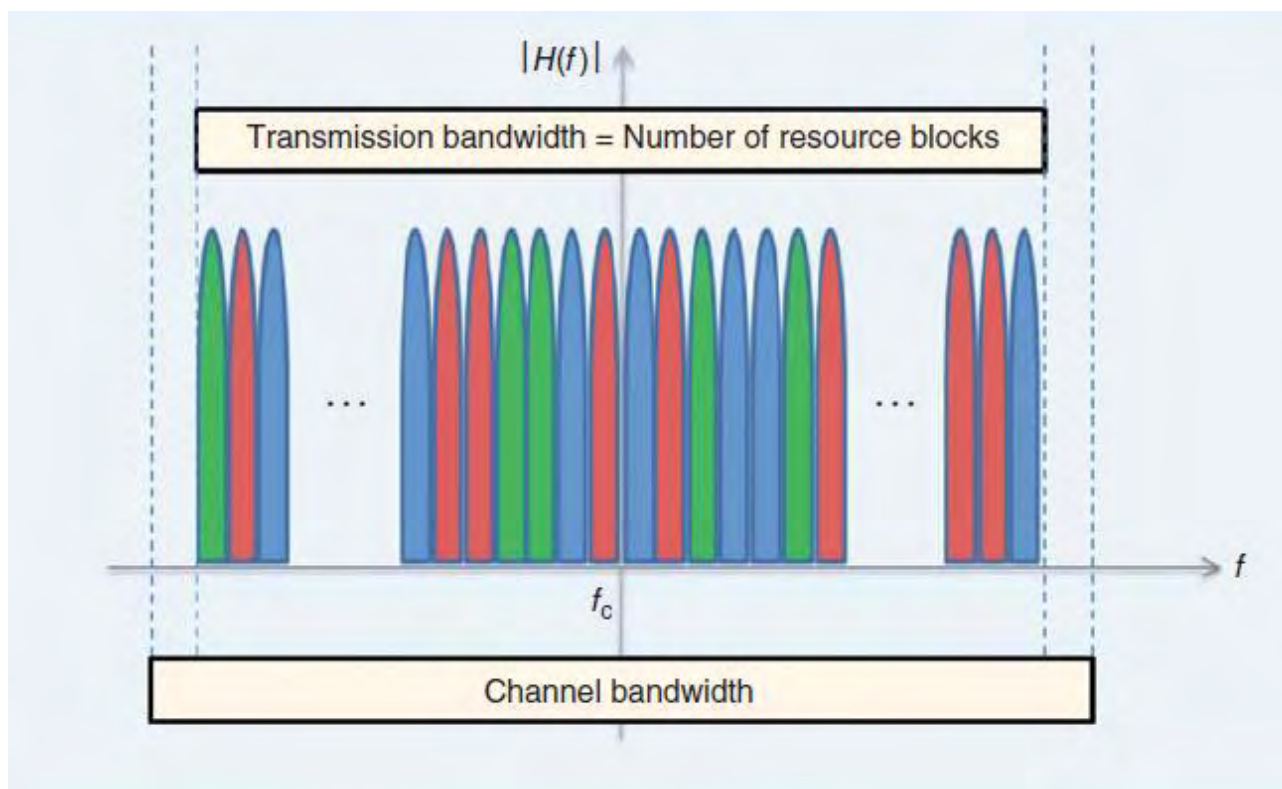
Συγκεκριμένα το φάσμα μετάδοσης οργανώνεται σε ομάδες. Κάθε ομάδα περιλαμβάνει **12 υποφέρουσες** (subcarriers) και ορίζει ένα Resource Block (RB). Με φασματική απόσταση $\Delta f = 15\text{kHz}$ το RB έχει μέγεθος 180kHz στο πεδίο της συχνότητας. Η διαμόρφωση του φάσματος των καναλιών προκύπτει από την αλληλουχία διαφορετικού αριθμού RBs ο οποίος κυμαίνεται από **6 έως 100** για 1.4 έως 20MHz αντίστοιχα.

Ο πίνακας 3.4 παρουσιάζει το εύρος ζώνης των καναλιών που υποστηρίζει το LTE, το πλήθος των RBs που απαιτείται και τον αριθμό των υποφορέων που χρησιμοποιούνται από το κάθε κανάλι για τη μετάδοση.

Total Bandwidth (MHz)	Number of resource blocks	Number of subcarriers	Occupied Bandwidth (MHz)	Usual guard bands (MHz)
1.4	6	72	1.08	2x0.16
3	15	180	2.7	2x0.15
5	25	300	4.5	2x0.25
10	50	600	9	2x0.5
15	75	900	13.5	2x0.75
20	100	1200	18	2x1

Πίνακας 3.4: Εύρος ζώνης καναλιών στο LTE

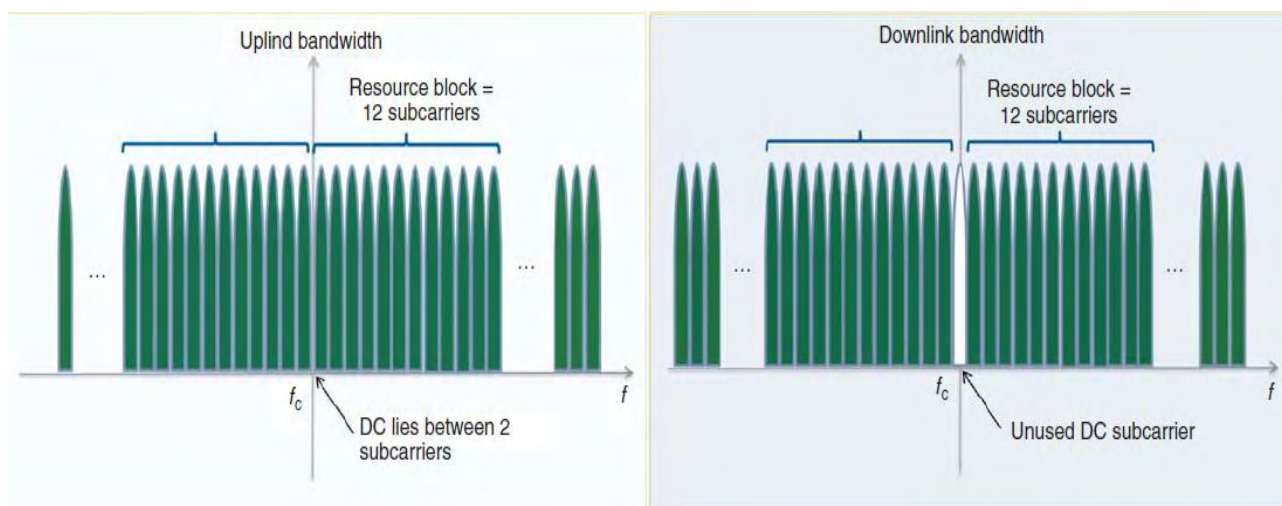
Το μικρότερο εύρος ζώνης στο LTE είναι το 1.4MHz το οποίο δημιουργείται από 6 RBs και 72 subcarriers για τη μεταφορά των δεδομένων του χρήστη και των μηνυμάτων σηματοδότησης. Όσο περισσότερα RBs χρησιμοποιούμε τόσο υψηλότερος είναι ο ρυθμός μετάδοσης στο κανάλι. Το φάσμα των 20MHz υπό ιδανικές συνθήκες επιτυγχάνει το μέγιστο ρυθμό. Σύμφωνα με τις προδιαγραφές προβλέπεται η ύπαρξη δύο ζωνών προστασίας (guard bands) για κάθε κανάλι. Οι ζώνες αυτές τοποθετούνται στην αρχή και στο τέλος του φάσματος για να παρέχουν προστασία από την παρεμβολή μεταξύ γειτονικών φασμάτων και συνήθως έχουν το ίδιο πλάτος. Το LTE παρέχει τη δυνατότητα τροποποίησης τους ανάλογα με τις εκάστοτε συνθήκες.



Σχήμα 3.12: Εύρος ζώνης καναλιού μετάδοσης

Όπως παρατηρούμε στο σχήμα 3.12 το φάσμα μετάδοσης δεν συμπίπτει και είναι μικρότερο του εύρους ζώνης του καναλιού λόγω των guard bands. Για τα κανάλια από **3 έως 20MHz** ο λόγος του φάσματος μετάδοσης προς το συνολικό εύρος ζώνης ισούται με **90%** ενώ στην περίπτωση του **1.4MHz** το ποσοστό πέφτει περίπου στο **77%**.

Στον FDD τρόπο το φάσμα της κατερχόμενης και της ανερχόμενης ζεύξης συνήθως ορίζεται να είναι το ίδιο και προκύπτει από τη ομοιόμορφη διάταξη των υποφορέων αριστερά και δεξιά σε ίσες αποστάσεις από την κεντρική φέρουσα συχνότητα. Υπάρχει όμως μία διαφορά ανάμεσα στο downlink και στο uplink. Στην περίπτωση της ανερχόμενης ζεύξης η κεντρική συχνότητα βρίσκεται ανάμεσα σε δύο υποφέρουσες και έτσι δεν ορίζεται αχρησιμοποίητη DC υποφέρουσα. Στην κατερχόμενη ζεύξη ωστόσο η κεντρική συχνότητα συμπίπτει με μία υποφέρουσα. Η συγκεκριμένη υποφέρουσα δεν χρησιμοποιείται επειδή θα αποτελούσε πηγή ισχυρής παρεμβολής για τις γειτονικές υποφέρουσες.



Σχήμα 3.13: Resource blocks και DC υποφέρουσα ανερχόμενης και κατερχόμενης ζεύξης

Για τη διαμόρφωση του φάσματος όλων των καναλιών η φασματική απόσταση Δf και η χρονική διάρκεια του συμβόλου παραμένουν αμετάβλητα προκειμένου να διατηρείται σταθερό το χρονοδιάγραμμα του πλαισίου μεταφοράς στο πεδίο του χρόνου και να εφαρμόζονται οι ίδιες τεχνικές αντιστάθμισης για όλα τα κανάλια στο πεδίο της συχνότητας.

Η φασματική ευελιξία στο LTE προκύπτει από τη χρήση του αλγόριθμο **FFT**. Για να δημιουργήσουμε το σύνολο των καναλιών από 1.4 έως 20MHz μεταβάλλουμε το διάνυσμα εισόδου του. Όμως ο αλγόριθμος λειτουργεί αποτελεσματικά όταν η είσοδός του είναι δύναμη του 2. Αρχικά λοιπόν υπολογίζουμε το διάνυσμα εισόδου του αλγορίθμου ως δύναμη του 2. Έπειτα από τον πίνακα 3.4 βρίσκουμε τον αριθμό των resource blocks που συνθέτουν το επιθυμητό εύρος ζώνης και αξιοποιούμε μόνο τα σημεία του FFT που αντιστοιχούν στο απαιτούμενο πλήθος των υποφορέων του καναλιού. Στα υπόλοιπα σημεία του διανύσματος αναθέτουμε μηδενικές τιμές. Ο πίνακας 3.5 αναγράφει το μέγεθος του FFT για κάθε υποστηριζόμενο κανάλι.

OFDM parameters for downlink transmission subframe (1ms) and subcarrier spacing 15kHz						
Bandwidth (MHz)	1.4	3	5	10	15	20
Sampling frequency (MHz)	1.92	3.84	7.68	15.36	23.04	30.72
FFT size	128	256	512	1024	1536	2048
Number of resource blocks	6	15	25	50	75	100
OFDM symbols per subframe	14 / 12					
CP length	4.7 / 5.6					

Πίνακας 3.5: Resource blocks, FFT size και cyclic prefix για κάθε εύρος ζώνης καναλιού στο LTE.

3.7 Οργάνωση στο πεδίο του χρόνου

Η μικρότερη μονάδα χρόνου που υφίσταται στο LTE ορίζεται σύμφωνα με τη σχέση:

$$T_s = \frac{1}{15000 * 2048} \approx 32.6 \text{ ns} \quad (3.6)$$

Ως T_s ορίζεται το διάστημα δειγματοληψίας του αλγορίθμου FFT με διάνυσμα εισόδου 2048 σημεία που είναι και το μέγιστο που χρησιμοποιείται στο LTE για τη δημιουργία του καναλιού των 20MHz.

Η χρονική διάρκεια του συμβόλου προκύπτει από το T_s σύμφωνα με τον τύπο:

$$T = 2048 * T_s = 66.7 \mu\text{s} \quad (3.7)$$

Η παράμετρος T_s αποτελεί τη βάση υπολογισμού όλου του χρονοδιαγράμματος του LTE.

3.7.1 Δομή πλαισίου

Στο πεδίο του χρόνου οι μεταδόσεις της κατερχόμενης και ανερχόμενης ζεύξης οργανώνονται σε πλαίσια (frames). Κάθε πλαίσιο έχει χρονική διάρκεια:

$$T_f = 307200 * T_s = 10\text{ms} \quad (3.8)$$

Το LTE ορίζει δύο δομές πλαισίων μετάδοσης:

- Δομή πλαισίου τύπου 1 για το FDD (**Frame structure type 1**)
- Δομή πλαισίου τύπου 2 για το TDD (**Frame structure type 2**)

3.7.1.1 Δομή πλαισίου τύπου 1 (Frame structure type 1)

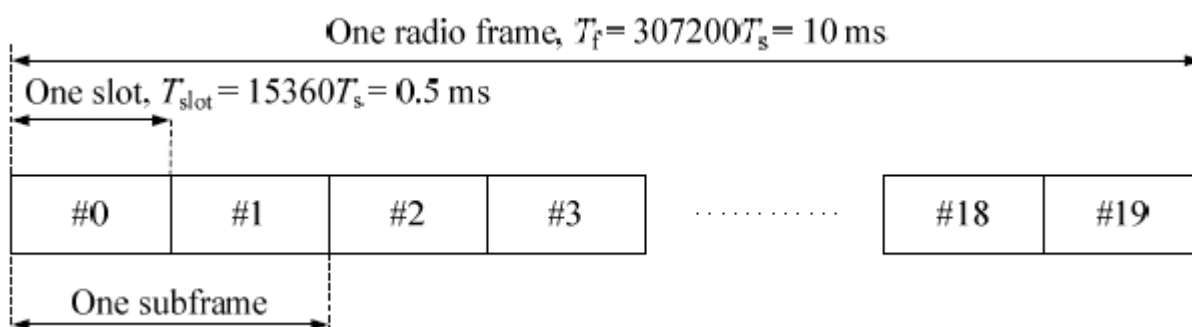
Η δομή πλαισίου τύπου 1 χρησιμοποιείται από τις τεχνικές **FDD** και **half duplex FDD**. Κάθε πλαίσιο (**frame**) μετάδοσης έχει διάρκεια **10ms** και υποδιαιρείται σε δέκα υποπλαίσια (**subframes**) των **1ms** το καθένα. Κάθε υποπλαίσιο αποτελείται από δύο χρονοθυρίδες (**slots**) με διάρκεια **0.5ms**. Το χρονοδιάγραμμα της δομής προκύπτει με βάση τη μικρότερη μονάδα χρόνου T_s σύμφωνα με τους παρακάτω τύπους:

$$T_{\text{frame}} = 307200 * T_s = 10 \text{ ms} \quad (3.9)$$

$$T_{\text{subframe}} = 30720 * T_s = 1\text{ms} \quad (3.10)$$

$$T_{\text{slot}} = 15360 * T_s = 0.5 \text{ ms} \quad (3.11)$$

Στην FDD τεχνική χρησιμοποιούνται δέκα υποπλαίσια για την κατερχόμενη και ανερχόμενη ζεύξη. Οι μεταδόσεις του downlink και του uplink διαχωρίζονται στη συχνότητα μέσω μίας ζώνης προστασίας (guard band). Ωστόσο η τεχνική half duplex FDD λόγω του τρόπου λειτουργίας της δεν παρέχει στη συσκευή τη δυνατότητα ταυτόχρονης αποστολής και λήψης δεδομένων. Η δομή του πλαισίου τύπου 1 απεικονίζεται στο σχήμα 3.14.



Σχήμα 3.14: Δομή πλαισίου τύπου 1

Μέσα στο πλαίσιο τα 10 υποπλάισια αριθμούνται από 0 έως 9 και οι 20 χρονοθυρίδες από 0 έως 19. Κάθε πλαίσιο αναγνωρίζεται από τον αριθμό πλαισίου συστήματος (System Frame Number - **SFN**) ο οποίος λαμβάνει τιμές από 0 έως 1023.

Η δομή του υποπλαισίου χρησιμοποιείται για χρονοπρογραμματισμό καθώς οι μεταδόσεις των δεδομένων της κατερχόμενης και ανερχόμενης ζεύξης προγραμματίζονται ένα υποπλάισιο κάθε φορά. Η δομή του πλαισίου συμβάλλει στον προγραμματισμό διαδικασιών του συστήματος που χαρακτηρίζονται από αργό ρυθμό μεταβολής.

3.7.1.2 Δομή πλαισίου τύπου 2 (Frame structure type 2)

Η δομή πλαισίου τύπου 2 χρησιμοποιείται από την τεχνική **TDD**. Στον TDD τρόπο μετάδοσης η χρονική διάρκεια του πλαισίου, του υποπλαισίου και της χρονοθυρίδας παραμένουν ίδιες με τη δομή τύπου 1. Κάθε **πλαίσιο** έχει διάρκεια $T_{\text{frame}} = 307200 * T_s = 10\text{ms}$ και υποδιαιρείται σε δύο **ημι-πλαίσια** διάρκειας $T_{\text{half-frame}} = 153600 * T_s = 5\text{ms}$. Κάθε ημι-πλάισιο αποτελείται από πέντε **υποπλάισια** διάρκειας $T_{\text{subframe}} = 30720 * T_s = 1\text{ms}$ με το κάθε υποπλάισιο να περιλαμβάνει δύο χρονοθυρίδες (**slots**) με διάρκεια $T_{\text{slot}} = 15360 * T_s = 0.5\text{ms}$.

Η διαφορά των δύο δομών έγκειται στο γεγονός ότι στη δομή τύπου 2 το κάθε υποπλάισιο ανατίθεται είτε στο downlink είτε στο uplink είτε για την απαραίτητη σηματοδότηση επιτελώντας ειδικό ρόλο. Ο ακριβής αριθμός των υποπλαισίων που διατίθενται στις δύο ζεύξεις, η θέση τους μέσα στο πλαίσιο και το χρονικό σημείο εναλλαγής μεταξύ των δύο μεταδόσεων καθορίζονται από την TDD διαμόρφωση.

Το LTE ορίζει επτά διαφορετικές **TDD διαμορφώσεις** επιτρέποντας ένα πλήθος αναλογιών της κατερχόμενης ως την ανερχόμενη ζεύξη καθώς και διαφορετικές περιόδους μετάβασης μεταξύ των μεταδόσεών τους. Ο πίνακας 3.6 συνοψίζει όλες τις επιτρεπόμενες TDD διαμορφώσεις.

Uplink- Downlink configuration	Downlink to Uplink Switch point periodicity (ms)	Subframe number									
		0	1	2	3	4	5	6	7	8	9
0	5	D	S	U	U	U	D	S	U	U	U
1	5	D	S	U	U	D	D	S	U	U	D
2	5	D	S	U	D	D	D	S	U	D	D
3	10	D	S	U	U	U	D	D	D	D	D
4	10	D	S	U	U	D	D	D	D	D	D
5	10	D	S	U	D	D	D	D	D	D	D
6	5	D	S	U	U	U	D	S	U	U	D

Πίνακας 3.6: TDD configurations

Για κάθε διαμόρφωση τα υποπλαίσια αριθμούνται από 0 έως 9 και χαρακτηρίζονται με ένα από τα παρακάτω σύμβολα:

- **D** : το υποπλαίσιο δεσμεύεται για μετάδοση στην κατερχόμενη ζεύξη
- **U** : το υποπλαίσιο δεσμεύεται για μετάδοση στην ανερχόμενη ζεύξη
- **S** : ειδικό υποπλαίσιο (**special subframe**) που σηματοδοτεί την εναλλαγή μεταξύ των μεταδόσεων (**switch point**)

Ο σταθμός βάσης μέσα από την αναμετάδοση των πληροφοριών συστήματος (SI) γνωστοποιεί στις συσκευές την TDD διαμόρφωση που χρησιμοποιεί η κάθε κυψέλη. Κάθε διαμόρφωση επιλέγεται με βάση τα κριτήρια που καθορίζουν τη φύση της μετάδοσης όπως το data rate της ζεύξης, το είδος και οι απαιτήσεις της υπηρεσίας κ.α.. Αν παραδείγματος χάρη υφίσταται ισοκατανομή μεταξύ των ρυθμών του uplink και του downlink τότε η διαμόρφωση 1 αποτελεί μία κατάλληλη επιλογή. Σε αντίθετη περίπτωση επιλέγουμε την διαμόρφωση της οποίας ο λόγος των υποπλαισίων downlink προς uplink ικανοποιεί τις συνθήκες της μετάδοσης. Για παράδειγμα στην διαμόρφωση 5 οι μεταδόσεις της κατερχόμενης ζεύξης υπερτερούν έναντι της ανερχόμενης ενώ στη διαμόρφωση 0 συμβαίνει ακριβώς το αντίθετο.

Διαφορετικές κυψέλες επιτρέπεται να χρησιμοποιούν διαφορετική TDD διαμόρφωση. Όμως τα γειτονικά κύτταρα επιβάλλεται να λειτουργούν με τον ίδιο TDD σχηματισμό προκειμένου να παρέχεται προστασία έναντι των παρεμβολών μεταξύ του downlink και του uplink.

Κάθε TDD διαμόρφωση εκτός των υποπλαισίων μεταφοράς δεδομένων περιέχει και ειδικά υποπλαίσια (special subframes) τα οποία ορίζουν το χρονικό σημείο (switch point) μετάβασης από το downlink στο uplink. Κάθε ειδικό υποπλαίσιο αποτελείται από τρεις περιοχές:

- Ειδική περιοχή κατερχόμενης ζεύξης (special downlink region) **DwPTS**
- Ειδική περιοχή ανερχόμενης ζεύξης (special uplink region) **UpPTS**
- Περιοχή προστασίας GP (**Guard Period**)

Η ειδική περιοχή κατερχόμενης ζεύξης DwPTS χρησιμοποιείται κανονικά για τη μετάδοση downlink δεδομένων όπως και κάθε υποπλαίσιο downlink (D).

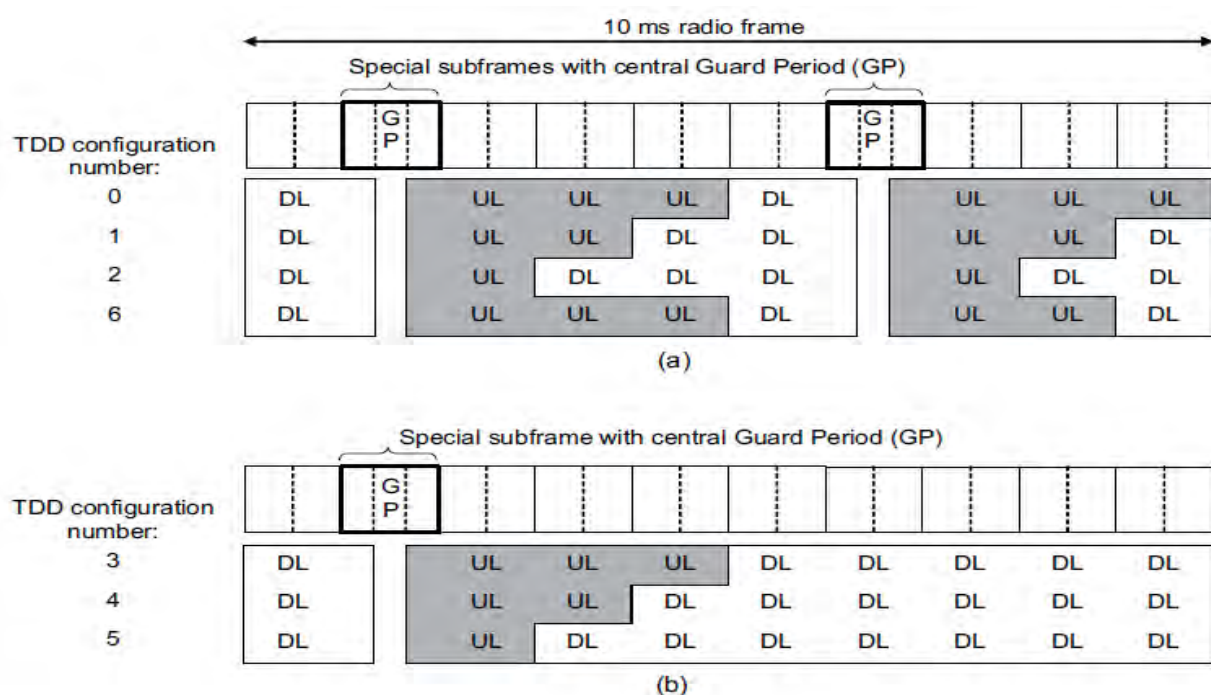
Η ειδική περιοχή ανερχόμενης ζεύξης UpPTS χρησιμοποιείται μόνο από το κανάλι RACH (Random Access CHannel) ή για μετάδοση του σήματος αναφοράς SRS (Sounding Reference Signal).

Μεταξύ των δύο περιοχών παρεμβάλλεται η περιοχή προστασίας GP. Το μήκος των DwPTS και UpPTS διαμορφώνεται κατά περίπτωση και προκύπτει από τον πίνακα 3.7.

Special subframe configuration	Normal cyclic prefix in downlink			Extended cyclic prefix in downlink		
	DwPTS	UpPTS		DwPTS	UpPTS	
		Normal cyclic prefix in uplink	Extended cyclic prefix in uplink		Normal cyclic prefix in uplink	Extended cyclic prefix in uplink
0	$6592 \cdot T_s$			$7680 \cdot T_s$		
1	$19760 \cdot T_s$			$20480 \cdot T_s$		
2	$21952 \cdot T_s$	$2192 \cdot T_s$	$2560 \cdot T_s$	$23040 \cdot T_s$	$2192 \cdot T_s$	$2560 \cdot T_s$
3	$24144 \cdot T_s$			$25600 \cdot T_s$		
4	$26336 \cdot T_s$			$7680 \cdot T_s$		
5	$6592 \cdot T_s$			$20480 \cdot T_s$	$4384 \cdot T_s$	$5120 \cdot T_s$
6	$19760 \cdot T_s$			$23040 \cdot T_s$		
7	$21952 \cdot T_s$	$4384 \cdot T_s$	$5120 \cdot T_s$	-	-	-
8	$24144 \cdot T_s$			-	-	-

Πίνακας 3.7: Configuration of special subframe length (DwPTS, GP, UpPTS)

Το LTE πρότυπο υποστηρίζει δύο περιόδους εναλλαγής από το downlink στο uplink διάρκειας **5ms** και **10ms**. Οι TDD διαμορφώσεις με περίοδο μετάβασης 5ms περιλαμβάνουν 2 ειδικά υποπλαίσια, ένα σε κάθε ημι-πλαίσιο. Στην περίπτωση των διαμορφώσεων με περίοδο 10ms υπάρχει μόνο ένα ειδικό υποπλαίσιο το οποίο τοποθετείται πάντα στο πρώτο ημι-πλαίσιο. Το σχήμα 3.15 απεικονίζει τις διαμορφώσεις κατηγοριοποιημένες ως προς την περίοδο εναλλαγής 5ms και 10ms που επιτυγχάνουν.

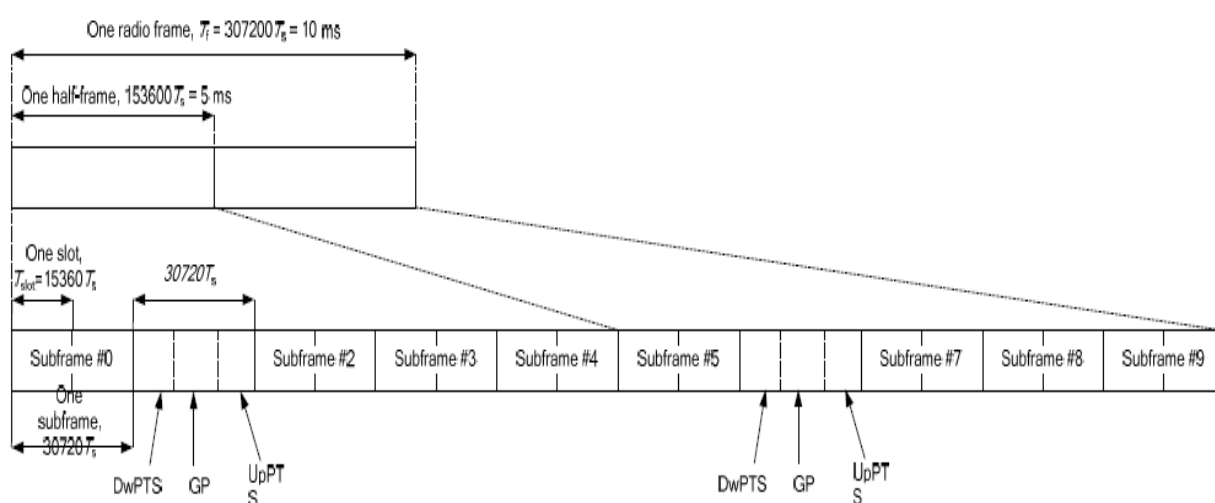


Σχήμα 3.15: Δομή πλαισίου τύπου 2 (a) 5ms switch point (b) 10 ms switch point

Μελετώντας τον πίνακα 3.6 των TDD διαμορφώσεων συμπεραίνουμε τα εξής:

- Το ειδικό υποπλαίσιο (S) υποδεικνύει το χρονικό σημείο (5ms ή 10ms) της μετάβασης πάντα από το downlink στο uplink και ποτέ το αντίστροφο.
- Σε όλες τις διαμορφώσεις τα υποπλαίσια 0 και 5 και η περιοχή DwPTS χρησιμοποιούνται πάντα για τη μετάδοση downlink δεδομένων ενώ το υποπλαίσιο 2 πάντα για uplink μετάδοση εφόσον τοποθετείται μετά από ειδικό υποπλαίσιο.
- Σε όλους τους σχηματισμούς η περιοχή UpPTS και οποιοδήποτε υποπλαίσιο βρίσκεται μετά από ειδικό υποπλαίσιο χρησιμοποιείται μόνο για το uplink.
- Οι διαμορφώσεις με περίοδο 5ms περιλαμβάνουν δύο ειδικά υποπλαίσια ένα σε κάθε ημι-πλαίσιο. Για να προκύψει και να διατηρηθεί η συγκεκριμένη περιοδικότητα το πρώτο ειδικό υποπλαίσιο τοποθετείται πάντα στη θέση 1 και το δεύτερο πάντα στη θέση 6.
- Οι διαμορφώσεις με περίοδο εναλλαγής 10ms περιέχουν μόνο ένα ειδικό υποπλαίσιο το οποίο τοποθετείται πάντα στη θέση 1 του πλαισίου.
- Σε όλους τους σχηματισμούς το υποπλαίσιο 1 είναι πάντα ειδικό υποπλαίσιο και σημείο μετάβασης.

Η δομή του πλαισίου τύπου 2 για τις TDD διαμορφώσεις με περίοδο 5ms απεικονίζεται στο σχήμα 3.16.



Σχήμα 3.16: Δομή πλαισίου τύπου 2

Η ίδια δομή ισχύει και για τις διαμορφώσεις των 10ms με τη μόνη διαφορά ότι σε αυτές η θέση 6 δεν αντιστοιχεί σε ειδικό υποπλαίσιο αλλά χρησιμοποιείται μόνο για μετάδοση uplink δεδομένων.

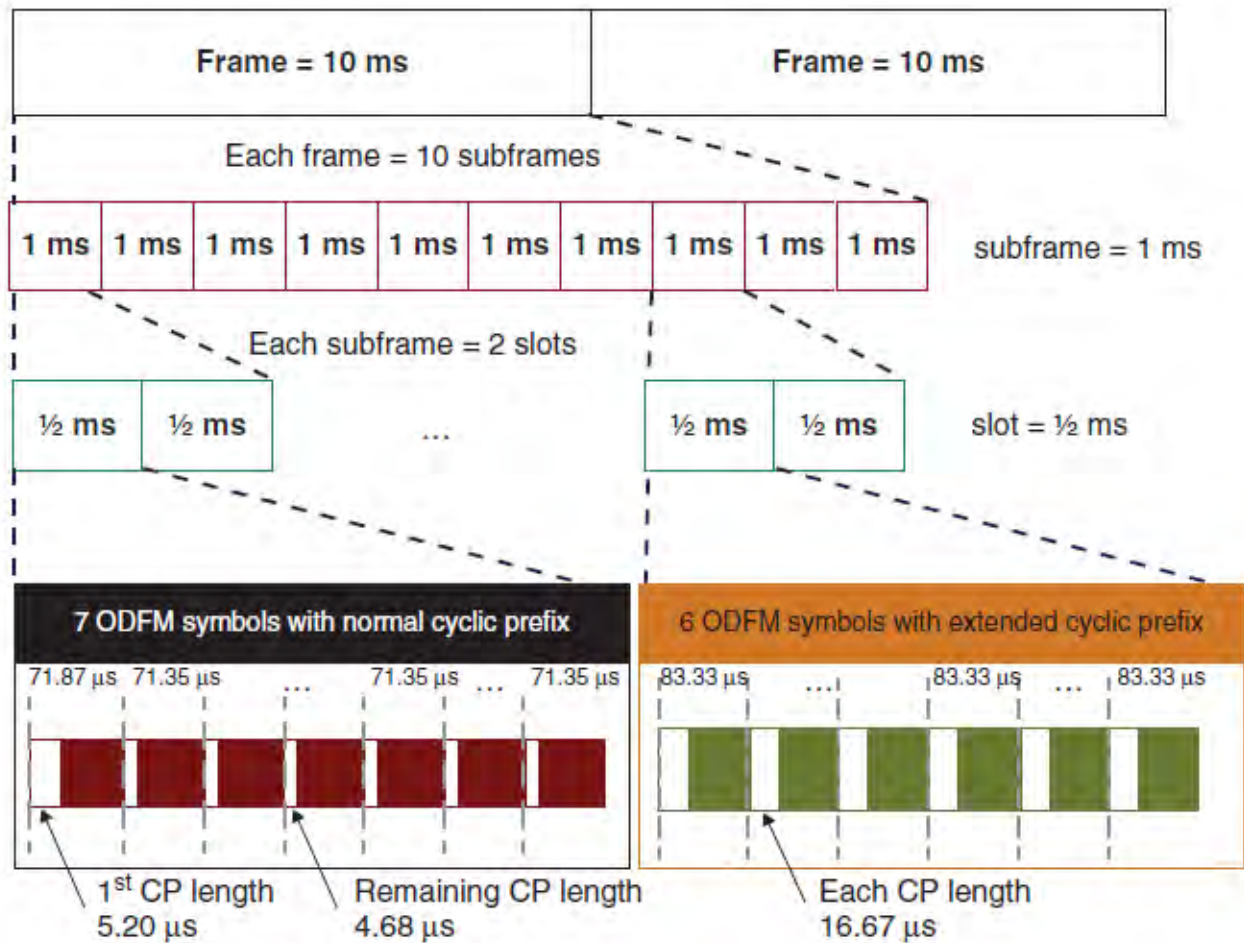
3.7.2 Δομή της χρονοθυρίδας

Η κατανόηση της μετάδοσης των OFDM συμβόλων στο πεδίο του χρόνου απαιτεί τη γνώση της δομής της χρονοθυρίδας και του τρόπου κατανομής των συμβόλων σε αυτήν. Κάθε υποπλαίσιο 1ms υποδιαιρείται σε δύο χρονοθυρίδες των 0.5ms. Κάθε χρονοθυρίδα αποτελείται από OFDM σύμβολα ο αριθμός των οποίων καθορίζεται από την τιμή του κυκλικού προθέματος.

Με χρήση **κανονικού κυκλικού προθέματος** ($160 \cdot T_s = 4.7\mu s$) σε κάθε χρονοθυρίδα τοποθετούνται **7 OFDM** σύμβολα. Στην περίπτωση αυτή το κυκλικό πρόθεμα του πρώτου συμβόλου είναι λίγο μεγαλύτερο με τιμή **5.2μs** προκειμένου να εξαιρεθεί η ανομοιομορφία λόγω του περιττού αριθμού συμβόλων. Με το **εκτεταμένο κυκλικό πρόθεμα** ($512 \cdot T_s = 16.67\mu s$) κάθε χρονοθυρίδα περιέχει **6 OFDM** σύμβολα τα οποία κατανέμονται ισομερώς σε όλο το μήκος της.

Ανεξαρτήτως της τιμής του κυκλικού προθέματος η διάρκεια του OFDM συμβόλου διατηρείται πάντα σταθερή και ίση με $2048 \cdot T_s = 66.7\mu s$ ώστε να διασφαλίζεται ότι το μήκος του υποπλαισίου παραμένει ίδιο για όλες τις φασματικές διαμορφώσεις των 1.4 έως 20MHz που υποστηρίζει το LTE. Με τον περιορισμό αυτό το χρονοδιάγραμμα της δομής του πλαισίου δεν μεταβάλλεται με αποτέλεσμα να απλοποιείται το μοντέλο μετάδοσης στο πεδίο του χρόνου.

Με τη χρήση του normal CP παρέχεται προστασία από τη διασυμβολική παρεμβολή που προκαλεί η χρονική διασπορά των **4.7μs** του καναλιού η οποία αντιστοιχεί σε διαφορά απόστασης περίπου **1.4km** μεταξύ των μεγαλύτερων και μικρότερων διαδρομών που διανύει το σήμα. Στην περίπτωση κυττάρων ευρείας γεωγραφικής κάλυψης χρησιμοποιούμε το extended CP που ισοδυναμεί στη μέγιστη διαφορά των **5km**. Η τιμή του κυκλικού προθέματος εμπεριέχεται στις πληροφορίες συστήματος τις οποίες αναμεταδίδει ο σταθμός βάσης κατά τη διαδικασία ενημέρωσης των συσκευών. Η δομή του LTE πλαισίου απεικονίζεται στο σχήμα 3.17.



Σχήμα 3.17: Δομή του LTE πλαισίου στο πεδίο του χρόνου

3.8 Οργάνωση στο πεδίο της συχνότητας

Το LTE χρησιμοποιεί την τεχνολογία OFDM για τη δημιουργία υποκαναλιών περιορισμένου εύρους ζώνης. Στο πεδίο της συχνότητας η μικρότερη δυνατή μονάδα φάσματος είναι ο υποφορέας (**subcarrier**) στον οποίο αντιστοιχεί ένα συμβολο. Οι υποφορείς κατανέμονται διαδοχικά με φασματική απόσταση **15kHz** και οργανώνονται σε ομάδες των 12 με την κάθε ομάδα να συγκροτεί ένα Resource Block (**RB**). Το μέγεθος του RB στη συχνότητα είναι **180kHz** και προκύπτει από τον αριθμό των υποφορέων και την μεταξύ τους απόσταση σύμφωνα με τον τύπο:

$$RB_{size} = N_{sc}^{RB} * \Delta_f = 180kHz \quad (3.12)$$

Το Resource Block αποτελεί τη δομική μονάδα για τη δημιουργία των καναλιών διαφορετικού εύρους ζώνης και την επίτευξη της φασματικής ευελιξίας. Ο αριθμός των RBs που χρησιμοποιούνται εξαρτάται από το διαθέσιμο φάσμα και κυμαίνεται από 6 έως 100. Για $N_{RB} = 6$ προκύπτει το μικρότερο κανάλι των **1.4MHz** ενώ για $N_{RB} = 100$ το μέγιστο των **20MHz**.

Ο σταθμός βάσης χρησιμοποιεί το RB για τον προγραμματισμό των πόρων στο πεδίο της συχνότητας και ορίζει το πλήθος που αναθέτει σε κάθε χρήστη. Ο αριθμός τους και ο τύπος της διαμόρφωσης καθορίζουν τον ρυθμό των δεδομένων. Περισσότερα RBs και υψηλότερο σχήμα διαμόρφωσης συνεπάγονται μεγαλύτερο ρυθμό μετάδοσης. Συνήθως το εύρος ζώνης του downlink και του uplink είναι ίδιο. Ο σταθμός βάσης γνωστοποιεί στη συσκευή την τιμή του N_{RB} μέσω της αναμετάδοσης των πληροφοριών συστήματος.

3.8.1 Υλοποίηση υποφορέων

Οι τεχνολογίες OFDMA και SC-FDM χρησιμοποιούνται για την παραγωγή των OFDM συμβόλων της κατερχόμενης και ανερχόμενης ζεύξης αντίστοιχα με στόχο την δημιουργία υποκαναλιών σταθερής απόκρισης στο πεδίο της συχνότητας ώστε να ισχύει $C(f_k) \approx C_k$.

Οι υποφορείς οργανώνονται σε RBs και εν συνεχεία τα RBs διατάσσονται στη συχνότητα για την υλοποίηση του φάσματος μετάδοσης. Το πλήθος των υποφερουσών κάθε καναλιού είναι συνάρτηση του αριθμού των RBs και του αριθμού των υποφορέων ανά RB και υπολογίζεται ως εξής:

$$N_{sc}^{channel} = N_{RB} * N_{sc}^{RB} \quad (3.13)$$

Η ελάχιστη τιμή του $N_{sc}^{channel}$ είναι **72 υποφέρουσες** και αντιστοιχεί στο κανάλι **1.4MHz** ενώ η μέγιστη **1200** για το κανάλι των **20MHz**. Ανεξάρτητα από τη διαμόρφωση του φάσματος η απόσταση των 15kHz μεταξύ των υποφερουσών παραμένει πάντα σταθερή αφού όπως αναφέραμε στην ενότητα 3.3.3 επιτυγχάνει την ιδιότητα της ορθογωνιότητας και εξαλείφει την παρεμβολή ICI.

Ο απαιτούμενος αριθμός subcarriers προκύπτει από τον αλγόριθμο FFT. Στο LTE το μέγεθος του **FFT** ορίζεται στα **2048** σημεία που αντιστοιχεί στο μέγιστο δυνατό φάσμα των 20MHz. Επειδή η λειτουργία του καθίσταται αποτελεσματική μόνο υπό την προϋπόθεση ότι η είσοδος του εκφράζεται ως δύναμη του 2, για την υλοποίηση των καναλιών 1.4, 3, 5, 10 και 15MHz αξιοποιούμε μόνο τον αριθμό των υποφορέων που αντιστοιχούν στο κάθε κανάλι και στις υπόλοιπες εισόδους αποδίδουμε μηδενικές τιμές.

Διατηρώντας σταθερό το εύρος ζώνης κάθε υποφέρουσας και μεταβάλλοντας μόνο το διάνυσμα εισόδου του FFT για τη διαμόρφωση των καναλιών επιτυγχάνουμε ευελιξία φάσματος, ομοιόμορφες συνθήκες μετάδοσης για κάθε RB, αποδοτικότερη διαχείριση και εκμετάλλευση των καναλιών επιλεκτικής συχνότητας και απλοποίηση της αρχιτεκτονικής του δέκτη ο οποίος λόγω της OFDMA και SC-FDM τεχνικής

αποτελείται από μία συστοιχία ισοσταθμιστών μειωμένης πολυπλοκότητας έναν για κάθε υποκανάλι.

3.8.2 Κριτήρια επιλογής RB size

Ο τύπος 3.12 υποδεικνύει ότι το μέγεθος του RB ορίζεται στα 180kHz και δεν μεταβάλλεται αφού οι παράμετροι N_{SC}^{RB} και Δf είναι σταθερές. Τίθενται επομένως τα ερωτήματα αν το μέγεθος των 180kHz είναι επαρκές και με ποια κριτήρια πραγματοποιήθηκε η συγκεκριμένη επιλογή.

Αρκετοί παράγοντες υπεισέρχονται στη διαδικασία λήψης αποφάσεων αναφορικά με το επιθυμητό μέγεθος του RB. Η επιλογή βασίζεται στην προσπάθεια αντιμετώπισης των δυσμενών συνθηκών μετάδοσης στο κανάλι, την αποδοτικότερη εκμετάλλευση των πόρων στη συχνότητα και την επιδίωξη υψηλής απόδοσης του συστήματος. Αρχικά λοιπόν εφόσον το RB είναι η δομική μονάδα των καναλιών μεταφοράς θα πρέπει το μέγεθός του να είναι αρκετά μικρό ώστε η απόκριση συχνότητας του να είναι όσο το δυνατόν πιο σταθερή. Ένα μικρό RB size εξασφαλίζει ομοιόμορφες συνθήκες μετάδοσης χάρη στη δυνατότητα επιλογής των υποφορέων με καλά χαρακτηριστικά διάδοσης και υψηλό SNR. Εκμεταλλευόμαστε επομένως στο έπακρο τα οφέλη της τεχνικής OFDM, επιτυγχάνουμε χαμηλό ποσοστό σφαλμάτων και ελαχιστοποιούμε την πολυπλοκότητα σχεδίασης του δέκτη για την ανάκτηση της πληροφορίας.

Γνωρίζουμε επίσης ότι ο σταθμός βάσης χρησιμοποιεί το RB για τον προγραμματισμό της κατανομής των πόρων στη συχνότητα. Το LTE υποστηρίζει την τεχνική προσαρμογής ζεύξης (link adaptation) για την αποτελεσματική διαχείριση των πόρων σύμφωνα με την οποία αξιολογούνται οι συνθήκες μετάδοσης του καναλιού και έπειτα ο σταθμός βάσης αποφασίζει ποιες παράμετροι πρέπει να τροποποιηθούν όπως το σχήμα διαμόρφωσης και κωδικοποίησης (Modulation and Coding Schemes - MCS), η ισχύς μετάδοσης, ο αριθμός των transmission layers, οι MIMO transmission modes με σκοπό την αξιόπιστη μετάδοση σε όλα τα περιβάλλοντα διάδοσης.

Η εκτίμηση των συνθηκών του καναλιού είναι αρμοδιότητα της συσκευής καθώς ο σταθμός βάσης δεν είναι σε θέση να γνωρίζει ποια RB υφίστανται φαινόμενα εξασθένησης και διαλείψεων. Η συσκευή πραγματοποιεί μετρήσεις και αποστέλλει τα αποτελέσματα στο σταθμό βάσης. Οι μετρήσεις περιλαμβάνουν τους δείκτες CQI (Channel Quality Indicator), PMI (Precoding Matrix Indicator) και RI (Rank Indicator). Επομένως για την αποφυγή καταστάσεων συμφόρησης λόγω της συχνής αποστολής των μετρήσεων στο σταθμό βάσης το μέγεθος του RB πρέπει να είναι αρκετά μεγάλο. Από την ικανοποίηση των παραπάνω απαιτήσεων προκύπτει το μέγεθος των 180kHz για το RB.

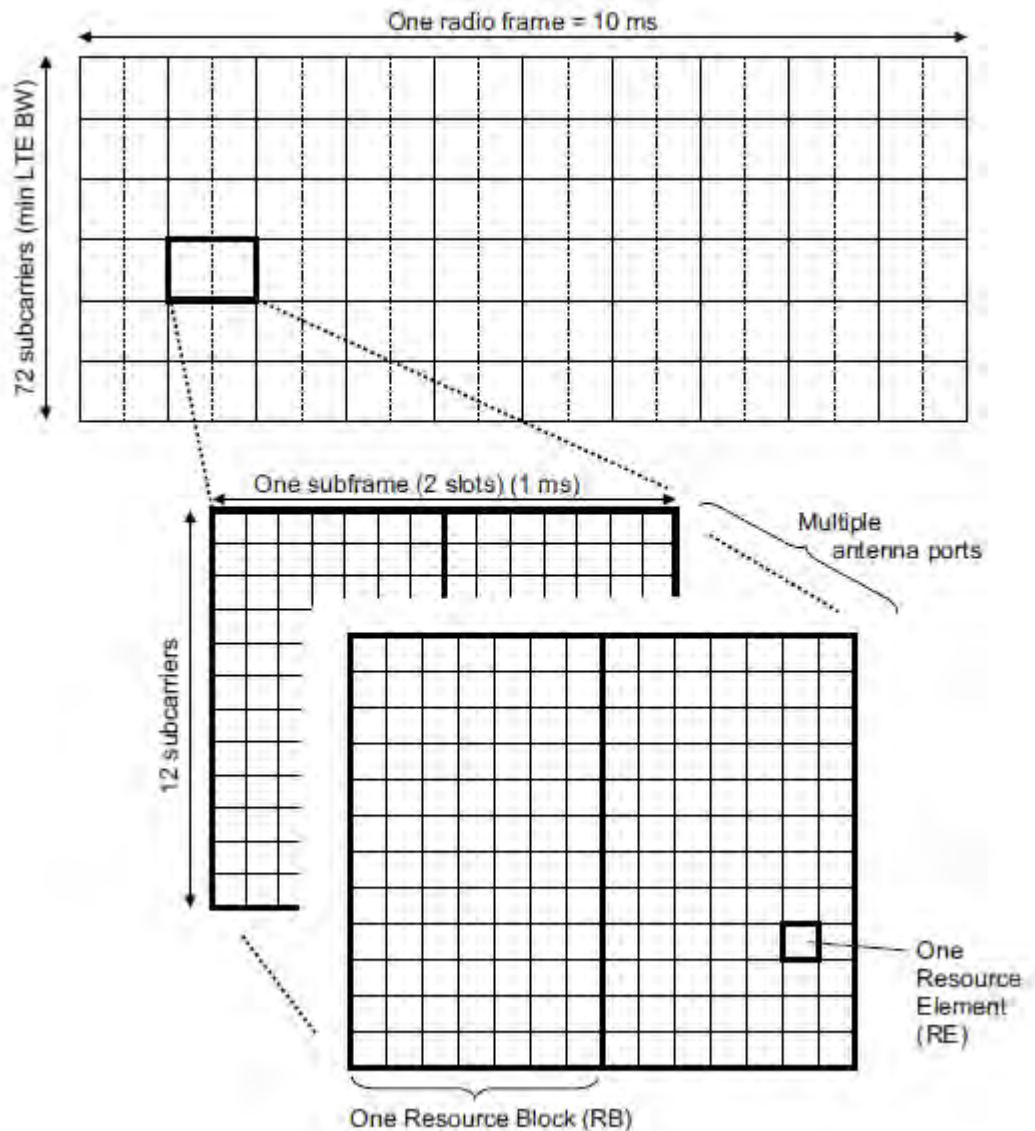
3.9 Αναπαράσταση στο πεδίο του χρόνου και της συχνότητας

Στο LTE η πληροφορία οργανώνεται σε τρεις διαστάσεις: το χώρο, το χρόνο και τη συχνότητα.

- Η διάσταση του **χρόνου** σχετίζεται με την αναπαράσταση των OFDM συμβόλων στο πεδίο του χρόνου και την οργάνωσή τους σε πλαίσια, υποπλαίσια και χρονοθυρίδες.
- Η διάσταση της **συχνότητας** συνδέεται με την αναπαράσταση των OFDM συμβόλων στο πεδίο της συχνότητας και την αντιστοίχισή τους σε subcarriers και resource blocks.
- Η διάσταση του **χώρου** εμφανίζεται στη περίπτωση της μετάδοσης με χρήση τεχνικών πολλαπλών κεραιών (multiple antennas transmission) και αντιπροσωπεύει την οργάνωση των OFDM συμβόλων σε επίπεδα (**layers**). Κάθε layer αντιστοιχεί σε μία διάταξη των πόρων στο χρόνο και τη συχνότητα. Οι μεταδόσεις πολλαπλών κεραιών οργανώνονται σε θύρες (**antenna ports**) με την κάθε θύρα να τροφοδοτείται με το δικό της layer.

Οι διαστάσεις του χώρου, του χρόνου και της συχνότητας αλληλεπιδρούν και συσχετίζονται μέσα από τις έννοιες του Resource grid, του Resource block (RB) και του Resource element (RE).

Συνεπώς η κατανόηση της μετάδοσης της πληροφορίας στο LTE απαιτεί τη γνώση της αναπαράστασης των δεδομένων στις τρεις διαστάσεις, της οργάνωσής τους στο resource grid και της μετατροπής τους σε OFDM σύμβολα. Το σχήμα 3.18 απεικονίζει τη δομή των πόρων στο χώρο, το χρόνο και τη συχνότητα.



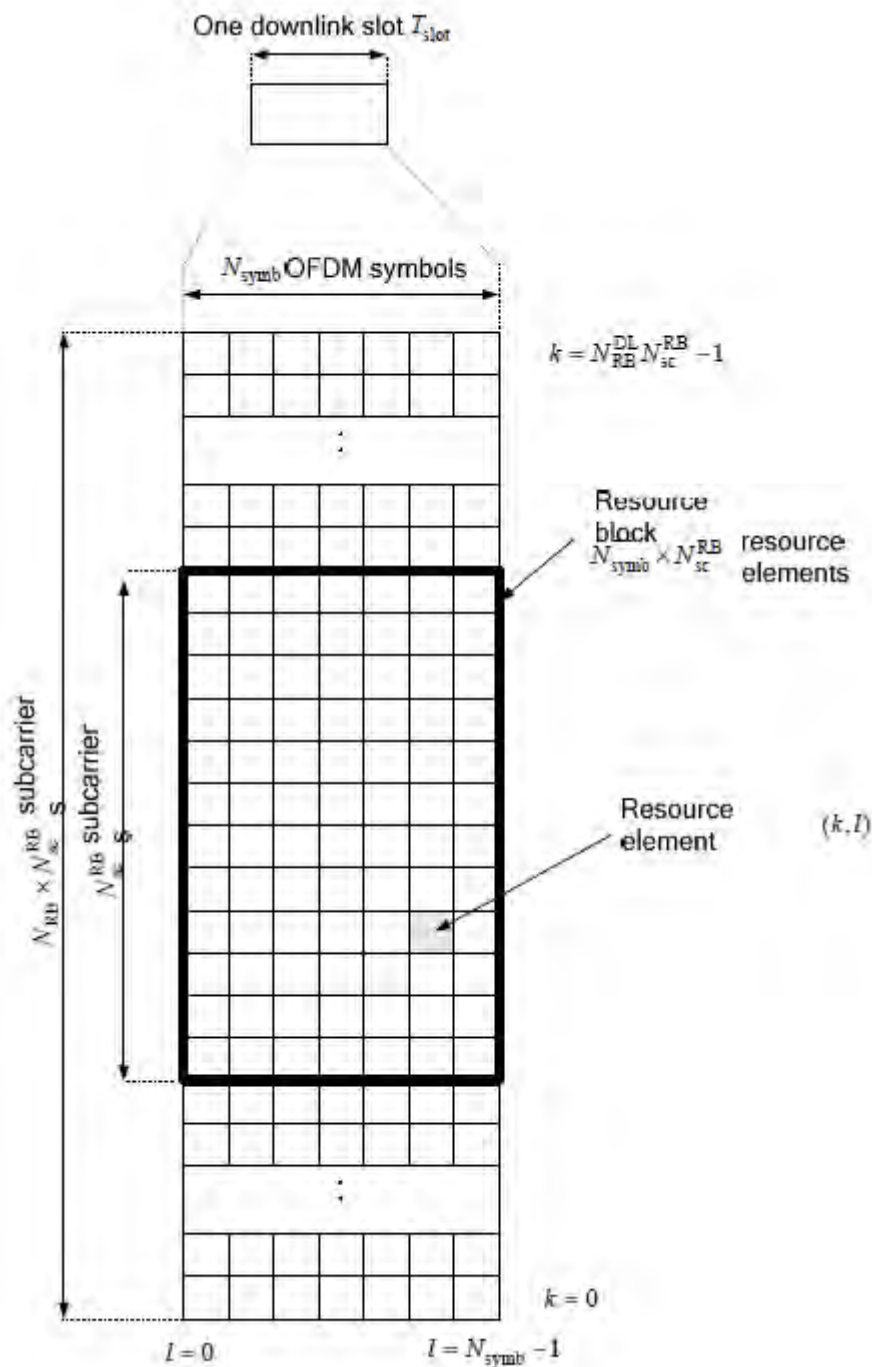
Σχήμα 3.18: LTE time - frequency resource structure

3.9.1 Resource grid

Η μετάδοση των δεδομένων στο LTE αποτελεί μία ρητή αναπαράσταση του σήματος στο χρόνο και τη συχνότητα. Το resource grid είναι ένα διδιάστατο σύστημα συντεταγμένων χρόνου και συχνότητας. Ο **άξονας x** στο πεδίο του **χρόνου** απεικονίζει την οργάνωση των OFDM συμβόλων σε επίπεδο χρονοθυρίδας και ορίζει το ακριβές χρονοδιάγραμμα μέσα από τη δομές του υποπλαισίου και του πλαισίου.

Ο **άξονας y** υποδηλώνει το πεδίο της **συχνότητας**, αναπαριστά τον τρόπο αντιστοίχισης των πόρων σε επίπεδο υποφορέα, απεικονίζει την οργάνωση των υποφορέων σε resource blocks και ορίζει το διαθέσιμο εύρος ζώνης της μετάδοσης.

Η δομή του downlink και uplink resource grid για την περίπτωση κανονικού κυκλικού προθέματος φαίνεται στο σχήμα 3.19.



Σχήμα 3.19: Δομή του resource grid

Το resource grid αποτελείται από $N_{RB} * N_{sc}^{RB}$ υποφορείς και N_{symb} OFDM σύμβολα όπου:

N_{RB} : ο αριθμός των RBs του φάσματος μετάδοσης του downlink ή του uplink

N_{sc}^{RB} : ο αριθμός των υποφορέων που συγκροτούν το resource block

N_{symb} : ο αριθμός των OFDM συμβόλων

Ο δείκτης l υποδεικνύει τη θέση του κάθε OFDM συμβόλου στο πεδίο του χρόνου και λαμβάνει τιμές από 0 έως $N_{symb} - 1$.

Ο δείκτης k υποδηλώνει τη θέση του κάθε υποφορέα στο πεδίο της συχνότητας και λαμβάνει τιμές από 0 έως $N_{RB} * N_{sc}^{RB} - 1$.

Η παράμετρος N_{RB} εξαρτάται από τη διαμόρφωση του φάσματος και ικανοποιεί τη συνθήκη:

$$N_{RB}^{min} \leq N_{RB} \leq N_{RB}^{max} \quad (3.14)$$

Όπου $N_{RB}^{min} = 6$ και $N_{RB}^{max} = 100$.

Για N_{RB}^{min} προκύπτει το ελάχιστο εύρος των **1.4MHz** το οποίο αντιστοιχεί σε **72 subcarriers** ενώ για N_{RB}^{max} το μέγιστο των **20MHz** που αποτελείται από **1200 subcarriers**. Οι ενδιάμεσες τιμές N_{RB} αναγράφονται στον πίνακα 3.4.

Ο αριθμός των συμβόλων που περιλαμβάνονται σε μία χρονοθυρίδα N_{symb}^{slot} εξαρτάται από το κυκλικό πρόθεμα (κανονικό ή εκτεταμένο) και από τη φασματική απόσταση (15kHz ή 7.5kHz). Ο πίνακας 3.8 συνοψίζει όλες τις περιπτώσεις.

Configuration		N_{sc}^{RB}	N_{symb}
Normal cyclic prefix	$\Delta f = 15\text{kHz}$	12	7
	$\Delta f = 7.5\text{kHz}$	24	3
Extended cyclic prefix	$\Delta f = 15\text{kHz}$	12	6
	$\Delta f = 7.5\text{kHz}$	24	3

Πίνακας 3.8: Physical resource blocks parameters

Στην περίπτωση της μετάδοσης πολλαπλών κεραιών σε κάθε θύρα κεραίας αντιστοιχεί ένα resource grid (layer).

3.9.2 Resource element

Το resource element (RE) είναι η μικρότερη μονάδα πόρων που αντιστοιχεί σε ένα OFDM σύμβολο στο πεδίο του χρόνου και σε ένα subcarrier στο πεδίο της συχνότητας. Ένα resource element μεταφέρει συνήθως **2, 4 ή 6 bits** ανάλογα με τον αν ο τύπος της διαμόρφωσης είναι **QPSK, 16-QAM ή 64-QAM** αντίστοιχα. Κάθε resource element προσδιορίζεται μοναδικά μέσα στο resource grid από ένα ζεύγος δεικτών (k, l) όπου:

l : ο δείκτης θέσης στο χρόνο με αρίθμηση από 0 έως $N_{symb} - 1$

k : ο δείκτης θέσης στη συχνότητα με αρίθμηση από 0 έως $N_{RB} * N_{sc}^{RB} - 1$

3.9.3 Resource block

Ένα resource block έχει μέγεθος **180kHz** (12 subcarriers) **στη συχνότητα** και διάρκεια **0.5ms** (1 slot) **στο χρόνο**. Τα REs οργανώνονται σε RBs. Κάθε RB αποτελείται από $N_{symb}^{slot} * N_{sc}^{RB}$ REs. Στην περίπτωση του **κανονικού κυκλικού προθέματος** κάθε χρονοθυρίδα έχει 7 OFDM σύμβολα και κάθε RB εμπεριέχει **84 REs**. Με χρήση **εκτεταμένου κυκλικού προθέματος** έχουμε 6 OFDM σύμβολα και το RB περιλαμβάνει **72 REs**. Η έννοια του RB είναι πολύ σημαντική αφού αποτελεί τη μικρότερη μονάδα προγραμματισμού πόρων στη συχνότητα.

Το LTE ορίζει δύο κατηγορίες resource blocks για την κατερχόμενη ζεύξη:

- Physical Resource Blocks (**PRBs**)
- Virtual Resource Blocks (**VRBs**)

3.9.3.1 Physical Resource Blocks (PRBs)

Για τα Physical Resource Blocks ισχύουν όσα αναφέραμε μέχρι τώρα για τα resource blocks στην ενότητα 3.9.3. Στο πεδίο της συχνότητας αριθμούνται από 0 έως $N_{RB} - 1$ και το αριθμός τους προκύπτει από τον τύπο:

$$n_{PRB} = \frac{k}{N_{sc}^{RB}} \quad (3.15)$$

όπου k ο συνολικός αριθμός των subcarriers του εύρους ζώνης του καναλιού.

3.9.3.2 Virtual Resource Blocks (VRBs)

Ένα Virtual Resource Block έχει ίδιο μέγεθος με ένα Physical Resource Block. Σε ένα υποπλαίσιο τοποθετούνται δύο VRBs στα οποία ανατίθεται ένας virtual resource block αριθμός n_{VRB} .

Ορίζονται δύο τύποι Virtual Resource Blocks:

- Virtual Resource Block **localized type**
- Virtual Resource Block **distributed type**

3.9.3.2.1 Virtual Resource Blocks localized type

Ανάμεσα στα localized VRBs και στα PRBs υπάρχει απευθείας αντιστοίχιση η οποία περιγράφεται από τις παρακάτω σχέσεις:

$$n_{VRB} = n_{PRB} \quad (3.16)$$

$$N_{VRB} = N_{PRB} \quad (3.17)$$

Τα localized VRBs αριθμούνται από 0 έως $N_{VRB} - 1$.

3.9.3.2.2 Virtual Resource Blocks distributed type

Η αντιστοίχιση ανάμεσα στα distributed VRBs και τα PRBs εξαρτάται από τον αριθμό των PRBs (N_{RB}) του φάσματος μετάδοσης της κατερχόμενης ζεύξης και την παράμετρο N_{gap} σύμφωνα με τον πίνακα 3.9.

System BW (N_{RB}^{DL})	Gap (N_{gap})	
	1 st Gap ($N_{gap,1}$)	2 nd Gap ($N_{gap,2}$)
6-10	$\left\lceil N_{RB}^{DL} / 2 \right\rceil$	N/A
11	4	N/A
12-19	8	N/A
20-26	12	N/A
27-44	18	N/A
45-49	27	N/A
50-63	27	9
64-79	32	16
80-110	48	16

Πίνακας 3.9: Resource block N_{gap} values

Για να υπολογίσουμε τον αριθμό των VRBs πρέπει να γνωρίζουμε την τιμή N_{gap} η οποία προκύπτει από τον παραπάνω πίνακα. Διακρίνουμε λοιπόν δύο περιπτώσεις υπολογισμού:

- Για $6 \leq N_{RB}^{DL} \leq 49$ υπάρχει μόνο μία τιμή για την παράμετρο N_{gap} :

$$N_{gap} = N_{gap,1} \quad (3.18)$$

- Για $50 \leq N_{RB}^{DL} \leq 110$ ορίζονται δύο τιμές N_{gap} :

$$N_{gap} = N_{gap,1}$$

$$N_{gap} = N_{gap,2}$$

Η τιμή που επιλέγεται για το N_{gap} καθορίζεται στη διαδικασία προγραμματισμού των πόρων και γνωστοποιείται μέσω της κατάλληλης σηματοδότησης.

Ο αριθμός των distributed VRBs υπολογίζεται με βάση τους παρακάτω τύπους:

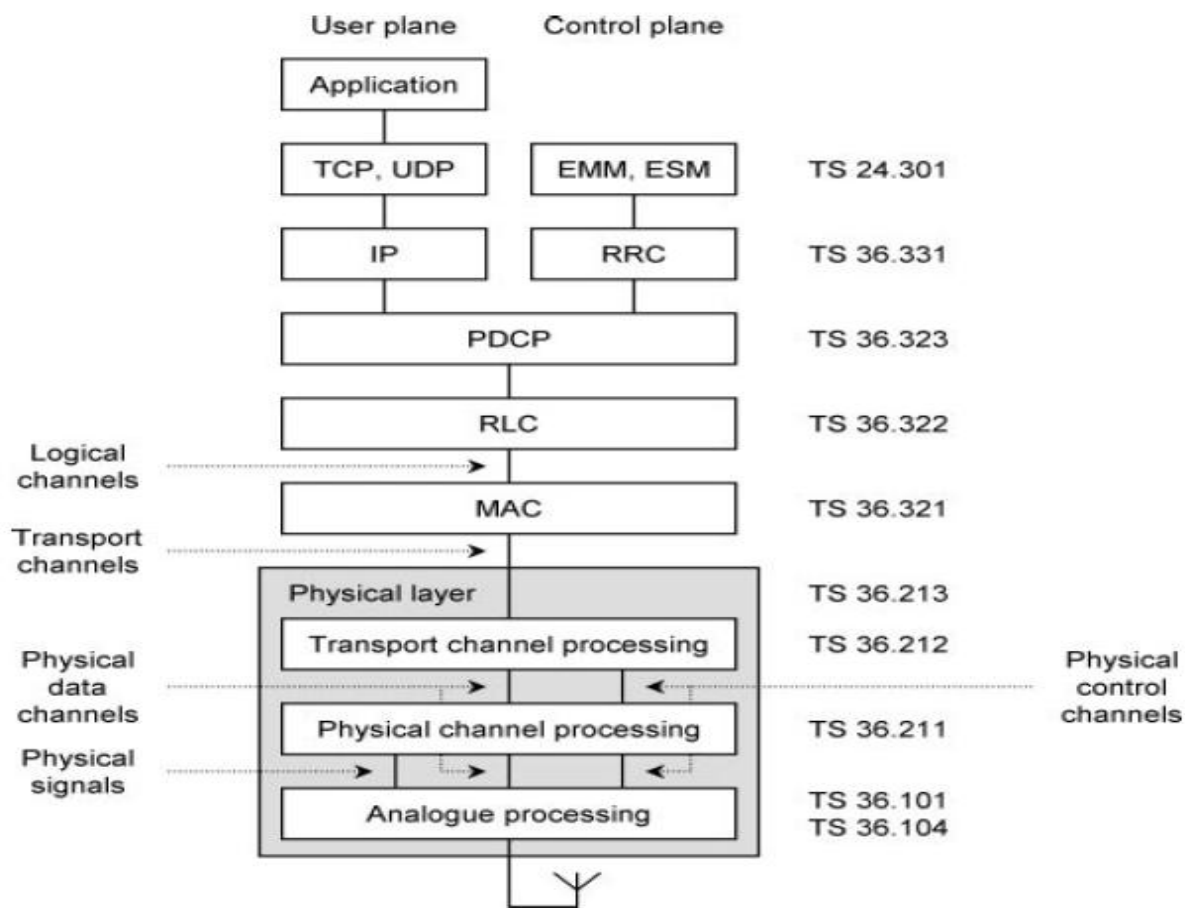
$$N_{VRB}^{DL} = N_{VRB,gap1}^{DL} = 2 * \min (N_{gap}, N_{RB}^{DL} - N_{gap}) \quad \text{για } N_{gap} = N_{gap,1} \quad (3.19)$$

$$N_{VRB}^{DL} = N_{VRB,gap2}^{DL} = \lfloor N_{RB}^{DL} / 2N_{gap} \rfloor * 2N_{gap} \quad \text{για } N_{gap} = N_{gap,2} \quad (3.20)$$

3.10 Κανάλια μετάδοσης

Μέχρι τώρα αναφερθήκαμε στο πεδίο του χρόνου και της συχνότητας μέσα από τον ορισμό των εννοιών του resource grid, του resource block και του resource element. Παρουσιάσαμε το χρονοδιάγραμμα της μετάδοσης μέσα από τις δομές του πλαισίου, του υπολαισίου και της χρονοθυρίδας και τον τρόπο οργάνωσης και απεικόνισης των συμβόλων σε υποφορείς. Από το συνδυασμό των συνιστωσών χρόνου και συχνότητας προκύπτει το OFDM σύμβολο που θα μεταδοθεί πάνω από τη διεπαφή του αέρα.

Ωστόσο όλα τα παραπάνω αποτελούν το τελευταίο στάδιο μίας αλληλουχίας βημάτων που σχετίζονται με τη δημιουργία, την επεξεργασία και τη ροή της πληροφορίας διαμέσου όλων των επιπέδων της αρχιτεκτονικής της διεπαφής αέρα. Η διαστρωμάτωση των πρωτοκόλλων του user plane και του control plane παρουσιάζεται στο σχήμα 3.20.



Σχήμα 3.20: Αρχιτεκτονική των πρωτοκόλλων της διεπαφής αέρα LTE-Uu

Κάθε πρωτόκολλο κατέχει συγκεκριμένη θέση μέσα την αρχιτεκτονική ανάλογα με τις λειτουργίες που επιτελεί και τις υπηρεσίες που προσφέρει στο αμέσως υψηλότερο επίπεδο. Στην περίπτωση του user plane της κατερχόμενης ζεύξης το επίπεδο της εφαρμογής (**application layer**) είναι η πηγή των πακέτων δεδομένων τα οποία προωθούνται και επεξεργάζονται από τα πρωτόκολλα **TCP/UDP** και **IP**. Παράλληλα το **RRC** επίπεδο του control plane δημιουργεί τα κατάλληλα μηνύματα σηματοδότησης που ανταλλάσσονται μεταξύ του σταθμού βάσης και της συσκευής. Στη συνέχεια τα δεδομένα του χρήστη και οι πληροφορίες ελέγχου υπόκεινται σε επεξεργασία από τα πρωτόκολλα **PDCP**, **RLC** και **MAC** που συγκροτούν το L2 επίπεδο πριν προωθηθούν στο **Physical layer** το οποίο επιτελεί ενέργειες όπως διαχείριση λαθών, διαμόρφωση, κωδικοποίηση, resource element mapping, δημιουργία και αποστολή OFDM συμβόλων. Κάθε στάδιο του φυσικού επιπέδου, **transport channel processing**, **physical channel processing** και **analogue processing** αναλαμβάνει συγκεκριμένες αρμοδιότητες κατά τη διαδικασία προετοιμασίας των δεδομένων και δημιουργίας του σήματος μετάδοσης.

Η ροή της πληροφορίας και η επικοινωνία μεταξύ των προαναφερθέντων πρωτοκόλλων πραγματοποιείται με τη χρήση καναλιών μετάδοσης και φυσικών

σημάτων. Το LTE χρησιμοποιεί **logical**, **transport** και **physical κανάλια** για τη μεταφορά των δεδομένων του χρήστη και των μηνυμάτων σηματοδότησης. Τα κανάλια διακρίνονται με βάση το είδος της πληροφορίας (control information ή user data) και τον τρόπο μεταφοράς της.

Παράλληλα παράγονται πληροφορίες ελέγχου και **φυσικά σήματα** από το Transport και Physical channel processing με σκοπό τη διαχείριση της εσωτερικής λειτουργίας του φυσικού επιπέδου. Τα φυσικά σήματα και οι πληροφορίες αυτές είναι ορατές μόνο στο Physical layer και δεν γίνονται αντιληπτές από τα υψηλότερα στρώματα της αρχιτεκτονικής.

Συνεπώς ο στόχος της αρχιτεκτονικής των πρωτοκόλλων είναι να ορίσει ένα σύνολο υπηρεσιών οι οποίες θα οργανώνουν τις πληροφορίες που μεταδίδουν μέσω των λογικών καναλιών, να αντιστοιχεί τα λογικά κανάλια στα κανάλια μεταφοράς και να ελέγχει με ποιο τρόπο και ποια χαρακτηριστικά η πληροφορία των φυσικών καναλιών θα αναπαρίσταται αποτελεσματικά μέσω του resource grid στο πεδίο του χρόνου και της συχνότητας για τη μετάδοση της στο ασύρματο μέσο.

3.10.1 Λογικά κανάλια (logical channels)

Τα λογικά κανάλια χρησιμοποιούνται για την επικοινωνία και την ανταλλαγή πληροφοριών ανάμεσα στα επίπεδα **RLC** και **MAC**. Στο LTE ορίζονται δύο τύποι λογικών καναλιών με κριτήριο το είδος της πληροφορίας που μεταφέρουν. Τα **λογικά κανάλια ελέγχου** μεταφέρουν τα μηνύματα σηματοδότησης του επιπέδου ελέγχου (control plane) και τα **λογικά κανάλια μεταφοράς** τα δεδομένα στο επίπεδο του χρήστη (user plane). Ωστόσο υπάρχει και ένας δευτερεύον τρόπος κατηγοριοποίησής τους βασιζόμενος στο τρόπο διάθεσής τους από το σύστημα προς το χρήστη. Τα αφιερωμένα λογικά κανάλια (**dedicated**) διατίθενται προς χρήση σε μία συγκεκριμένη συσκευή σε αντίθεση με τα κοινά λογικά κανάλια (**common**) τα οποία μεταφέρουν πληροφορία με αποδέκτη ένα σύνολο συσκευών.

Λογικά κανάλια ελέγχου (Control logical channels)

- *Common Control CHannel (CCCH)*: μεταφέρει τις πληροφορίες ελέγχου του φορέα σηματοδότησης SRB0 όταν δεν υφίσταται επιβεβαιωμένη σύνδεση ανάμεσα στη συσκευή και το σταθμό βάσης (π.χ. διαδικασία εγκαθίδρυσης RRC σύνδεσης - RRC connection establishment). Το CCCH χρησιμοποιείται για τη κατερχόμενη και ανερχόμενη ζεύξη. Τα RRC μηνύματα που μεταφέρονται από αυτό δεν είναι integrity protected και δεν χρησιμοποιούν την τεχνική ARQ κατά τη μετάδοσή τους στο RLC layer.

- *Dedicated Control CHannel (DCCH)*: μεταφέρει τις πληροφορίες ελέγχου των φορέων σηματοδοσίας SRB1 και SRB2 αναφορικά με μία συγκεκριμένη σύνδεση στην κατερχόμενη και ανερχόμενη ζεύξη. Χρησιμοποιείται όταν υπάρχει RRC σύνδεση μεταξύ της συσκευής και του σταθμού βάσης δηλαδή η συσκευή είναι σε κατάσταση RRC_CONNECTED. Για τα μηνύματα σηματοδοσίας του DCCH υποστηρίζονται τεχνικές integrity και ciphering protection από το επίπεδο PDCP και χρησιμοποιείται η τεχνική ARQ για την αξιόπιστη μετάδοση των δεδομένων του RLC επιπέδου.
- *Broadcast Control Channel (BCCH)*: χρησιμοποιείται για τη μεταφορά RRC μηνυμάτων πληροφοριών συστήματος στην κατερχόμενη ζεύξη. Οι πληροφορίες συστήματος (**System Information - SI**) αναμεταδίδονται από το σταθμό βάσης προς όλες τις συσκευές με σκοπό τη γνωστοποίηση σημαντικών παραμέτρων ρύθμισης και λειτουργίας της κυψέλης. Οι πληροφορίες SI οργανώνονται σε δύο κατηγορίες. Η πρώτη κατηγορία ονομάζεται κύρια ομάδα πληροφοριών (Master Block Information - **MIB**) και εμπεριέχει έναν περιορισμένο αριθμό των πιο συχνά μεταδιδόμενων παραμέτρων οι οποίες είναι απαραίτητες στη διαδικασία της αρχικής πρόσβασης της συσκευής στο δίκτυο. Στη δεύτερη κατηγορία ανήκουν οι υπόλοιπες ομάδες System Information Blocks – **SIBs** οι οποίες μεταφέρουν τις εναπομείναντες πληροφορίες συστήματος. Οι ομάδες MIB και SIBs αντιμετωπίζονται με διαφορετικό τρόπο από τα χαμηλότερα επίπεδα της αρχιτεκτονικής. Η εφαρμογή των πληροφοριών συστήματος εξαρτάται από την RRC κατάσταση της συσκευής (RRC_IDLE, RRC_CONNECTED).
- *Paging Control CHannel (PCCH)*: είναι κανάλι κατερχόμενης ζεύξης και χρησιμοποιείται από το σταθμό βάσης για την αποστολή ειδοποιήσεων προς μίας RRC_IDLE συσκευή με σκοπό την ενημέρωσή της για την ύπαρξη μίας εισερχόμενης κλήσης, αποθηκευμένων δεδομένων ή τυχόν αλλαγές των πληροφοριών συστήματος
- *Multicast Control CHannel (MCCH)*: πρόκειται για ένα κανάλι κατερχόμενης ζεύξης το οποίο χρησιμοποιείται για τη μετάδοση πληροφοριών ελέγχου αναφορικά με τη λήψη υπηρεσιών MBMS.

Λογικά κανάλια μεταφοράς (Traffic logical channels)

- *Dedicated Traffic CHannel (DTCH)*: χρησιμοποιείται για τη μεταφορά των δεδομένων ενός συγκεκριμένου χρήστη στην ανερχόμενη και κατερχόμενη ζεύξη. Τα δεδομένα του καναλιού υφίστανται κρυπτογράφηση, συμπίεση κεφαλίδας μέσω της τεχνικής ROHC και χρησιμοποιούν τον μηχανισμό ARQ του RLC επιπέδου.

- *Multicast Traffic CHannel (MTCH)*: χρησιμοποιείται για μεταφορά δεδομένων του χρήστη για τις υπηρεσίες MBMS.

Στον πίνακα 3.10 παρουσιάζονται συγκεντρωτικά όλα τα λογικά κανάλια του LTE, η έκδοση στην οποία ορίζονται, οι πληροφορίες που μεταφέρουν και το είδος της ζεύξης που τα χρησιμοποιεί.

Channel	Release	Name	Information	Direction
DTCH	R8	Dedicated traffic channel	User plane data	DL, UL
DCCH	R8	Dedicated control channel	Signalling on SRB1 & SRB2	DL, UL
CCCH	R8	Common control channel	Signalling on SRB0	DL, UL
PCCH	R8	Paging control channel	Paging messages	DL
BCCH	R8	Broadcast control channel	System information	DL
MCCH	R9	Multicast control channel	MBMS signaling	DL
MTCH	R9	Multicast traffic channel	MBMS data	DL

Πίνακα 3.10: Λογικά κανάλια στο LTE

3.10.2 Κανάλια μεταφοράς (Transport channels)

Η επικοινωνία ανάμεσα στο **MAC** και **Physical layer** επιτυγχάνεται μέσω των καναλιών μεταφοράς. Τα δεδομένα που μεταφέρονται από τα λογικά κανάλια πολυπλέκονται σε κανάλια μεταφοράς ανάλογα με τον τρόπο μετάδοσής τους στη διεπαφή αέρα. Τα κανάλια μεταφοράς υπόκεινται σε επεξεργασία από το τμήμα transport channel processing του φυσικού επιπέδου και διακρίνονται με βάση τη ζεύξη όπου χρησιμοποιούνται.

Κανάλια μεταφοράς κατερχόμενης ζεύξης (Downlink transport channels)

- *Downlink Shared CHannel (DL-SCH)*: χρησιμοποιείται για τη μεταφορά των δεδομένων του χρήστη στην κατερχόμενη ζεύξη, των μηνυμάτων ελέγχου και των πληροφοριών συστήματος SIBs οι οποίες δεν μεταφέρονται από το κανάλι BCH. Μαζί με το κανάλι UL-SCH αποτελούν τα σημαντικότερα κανάλια μεταφοράς.

- *Broadcast CHannel (BCH)*: χρησιμοποιείται για τη μεταφορά της κύριας ομάδας πληροφοριών συστήματος **MIB** του αντίστοιχου λογικού καναλιού BCCH η οποία είναι απαραίτητη για την προσπέλαση του καναλιού DL-SCH.
- *Paging CHannel (PCH)*: μεταφέρει τα μηνύματα ειδοποιήσεων (paging) του λογικού καναλιού PCCH για την ενημέρωση της συσκευής αναφορικά με την ύπαρξη downlink δεδομένων ή τη μεταβολή των πληροφοριών συστήματος.
- *Multicast CHannel (MCH)*: χρησιμοποιείται για τη μεταφορά των δεδομένων του χρήστη ή των μηνυμάτων ελέγχου των υπηρεσιών MBMS.

Κανάλια μεταφοράς ανερχόμενης ζεύξης (Uplink transport channels)

- *Uplink Shared CHannel (UL-SCH)*: χρησιμοποιείται για τη μεταφορά των δεδομένων του χρήστη και των μηνυμάτων ελέγχου στην ανερχόμενη ζεύξη.
- *Random Access CHannel (RACH)*: χρησιμοποιείται για την πρόσβαση της συσκευής στο δίκτυο και τη μεταφορά των δεδομένων της στην ανερχόμενη ζεύξη όταν δεν έχει προηγηθεί προγραμματισμός για την ανάθεση uplink πόρων σε αυτήν ή στην περίπτωση όπου δεν έχει επιτευχθεί ο συγχρονισμός της στην ανερχόμενη ζεύξη. Ο έλεγχος της τυχαίας πρόσβασης επιτελείται από το επίπεδο MAC.

Ο πίνακας 3.11 παρουσιάζει όλα τα κανάλια μεταφοράς του LTE.

Channel	Release	Name	Information	Direction
UL-SCH	R8	Uplink shared channel	Uplink data & signaling	UL
RACH	R8	Random access channel	Random access requests	UL
DL-SCH	R8	Downlink shared channel	Downlink data & signaling	DL
PCH	R8	Paging channel	Paging messages	DL
BCH	R8	Broadcast channel	MIB	DL
MCH	R8 / R9	Multicast channel	MBMS	DL

Πίνακας 3.11: Κανάλια μεταφοράς στο LTE

Τα κανάλια μεταφοράς διαφοροποιούνται ως προς τις τεχνικές διαχείρισης σφαλμάτων. Στα κανάλια DL-SCH και UL-SCH εφαρμόζονται οι τεχνολογίες

Automatic Repeat Request (ARQ) και Hybrid ARQ (HARQ) ενώ υποστηρίζεται η προσαρμογή του ρυθμού κωδικοποίησης ανάλογα με τις αλλαγές του λόγου SINR. Σε όλα τα υπόλοιπα κανάλια χρησιμοποιείται μόνο η τεχνική της εμπρόσθιας διόρθωσης λαθών (Forward Error Correction - FEC) και ορίζεται σταθερός ρυθμός κωδικοποίησης χωρίς να επιτρέπεται περαιτέρω προσαρμογή στις συνθήκες μετάδοσης.

3.10.3 Φυσικά κανάλια (Physical channels)

Η ροή των δεδομένων ανάμεσα στο **Transport** και **Physical channel processing** του φυσικού επιπέδου επιτυγχάνεται χάρη στα φυσικά κανάλια μεταφοράς. Τα φυσικά κανάλια διακρίνονται σε κανάλια δεδομένων (**physical data channels**) και σε κανάλια ελέγχου (**physical control channel**) ανάλογα με τη διαχείρισή τους από το physical channel processing και τον τρόπο απεικόνισής τους στο resource grid υπό τη μορφή συμβόλων και υποφορέων για τη δημιουργία του OFDM συμβόλου.

Φυσικά κανάλια δεδομένων (physical data channels)

- *Physical Downlink Shared CHannel (PDSCH)*: αποτελεί το κύριο κανάλι μετάδοσης πληροφοριών της κατερχόμενης ζεύξης στο LTE. Χρησιμοποιείται για τη μεταφορά των δεδομένων του χρήστη (user data), των μηνυμάτων σηματοδότησης και των πληροφοριών συστήματος SIBs του αντίστοιχου transport καναλιού DL-SCH καθώς και των ειδοποιήσεων (paging messages) του PCH εφόσον δεν υφίσταται αντίστοιχο κανάλι στο φυσικό επίπεδο.

Το PDSCH μεταδίδει τα δεδομένα υπό τη μορφή **Transport Blocks (TBs)** όπου το κάθε Transport Block αντιστοιχεί σε ένα MAC-PDU (MAC Protocol Data Unit) το οποίο παραδίδεται από το MAC στο Physical layer. Ένα TB καταλαμβάνει ένα υποπλαίσιο και έχει διάρκεια **1ms**. Συνήθως μεταδίδεται ένα κάθε φορά εκτός από την περίπτωση που χρησιμοποιείται η τεχνική MIMO της χωρικής πολυπλεξίας (spatial multiplexing) όπου αποστέλλονται ένα ή δύο TBs σε κάθε υποπλαίσιο αποσκοπώντας στην επίτευξη υψηλότερου ρυθμού μετάδοσης.

Το κανάλι PDSCH ανάλογα με τις συνθήκες της μετάδοσης υποστηρίζει τεχνικές πολλαπλών κεραιών όπως **transmit diversity**, **spatial multiplexing** και **beamforming**. Οι τεχνικές αυτές περιγράφονται από τους τρόπους μετάδοσης (Transmission Modes - TM). Ο σταθμός βάσης έχει τη δυνατότητα για κάθε PDSCH για κάθε συσκευή να ορίζει έναν τρόπο μετάδοσης. Ο τρόπος μετάδοσης υποδεικνύει στη συσκευή το είδος της επεξεργασίας που πρέπει να πραγματοποιήσει για να λάβει τα δεδομένα του PDSCH.

Το PDSCH υποστηρίζει διάφορα σχήματα διαμόρφωσης και κωδικοποίησης (MCS). Ο σταθμός βάσης μπορεί να τροποποιήσει και να προσαρμόσει τον τύπο της διαμόρφωσης και την κωδικοποίηση του καναλιού συμβαδίζοντας με τις αλλαγές του SINR επιτυγχάνοντας αξιόπιστη μεταφορά των δεδομένων του PDSCH για τις ισχύουσες συνθήκες διάδοσης.

- *Physical Broadcast CHannel (PBCH)*: χρησιμοποιείται από την κατερχόμενη ζεύξη για τη μεταφορά του Master Information Block – **MIB** από το αντίστοιχο κανάλι μεταφοράς BCH. Η MIB περιλαμβάνει πληροφορίες όπως ο αριθμός των κεραιών μετάδοσης, το εύρος ζώνης του καναλιού, ο αριθμός πλαισίου SFN και η διαμόρφωση του φυσικού καναλιού ελέγχου PHICH οι οποίες είναι απαραίτητες στη διαδικασία της αναγνώρισης της κυψέλης (cell acquisition). Η συσκευή εφόσον διαβάσει σωστά τη MIB μπορεί να προχωρήσει στη λήψη και την αποκωδικοποίηση των καναλιών ελέγχου και να επιτελέσει τις απαραίτητες ενέργειες για να προσπελάσει το δίκτυο.
- *Physical Random Access CHannel (PRACH)*: χρησιμοποιείται για την μεταφορά των μεταδόσεων τυχαίας πρόσβασης από το αντίστοιχο transport κανάλι RACH.
- *Physical Multicast CHannel (PMCH)*: είναι κανάλι κατερχόμενης ζεύξης για τη μεταφορά των δεδομένων των υπηρεσιών MBMS από το κανάλι MCH.
- *Physical Uplink Shared CHannel (PUSCH)*: αποτελεί το κύριο κανάλι μετάδοσης της ανερχόμενης ζεύξης. Χρησιμοποιείται για τη μεταφορά όλων των δεδομένων του χρήστη, των μηνυμάτων σηματοδότησης και σε κάποιες περιπτώσεις της πληροφορίας ελέγχου UCI (Uplink Control Information). Το κανάλι PUSCH υποστηρίζει την προσαρμογή του τύπου διαμόρφωσης ανάλογα με τις συνθήκες του ασύρματου μέσου και το λόγο SINR.

Ο πίνακας 3.12 παραθέτει όλα τα φυσικά κανάλια δεδομένων που χρησιμοποιούνται στο LTE.

Channel	Release	Name	Information	Direction
PUSCH	R8	Physical uplink shared channel	UL-SCH and/or UCI	UL
PRACH	R8	Physical random access channel	RACH	UL
PDSCH	R8	Physical downlink shared channel	DL-SCH and PCH	DL
PBCH	R8	Physical broadcast channel	BCH	DL
PMCH	R8 / R9	Physical multicast channel	MCH	DL

Πίνακας 3.12: Φυσικά κανάλια δεδομένων στο LTE

Φυσικά κανάλια ελέγχου (Physical control channels)

Τα φυσικά κανάλια ελέγχου χρησιμοποιούνται για τη μεταφορά των πληροφοριών ελέγχου που παράγονται από το Transport channel processing. Οι πληροφορίες αυτές υποστηρίζουν τη λειτουργία χαμηλού επιπέδου του Physical layer και δεν μπορούν να μεταφερθούν αποτελεσματικά και έγκαιρα από τα πρωτόκολλα υψηλότερου επιπέδου. Κάθε κανάλι ελέγχου μεταφέρει έναν συγκεκριμένο τύπο control information. Ο πίνακας 3.13 παραθέτει το πλήθος, το είδος και την πληροφορία που μεταφέρουν τα μηνύματα ελέγχου του φυσικού επιπέδου.

Field	Release	Name	Information	Direction
UCI	R8	Uplink control information	Hybrid ARQ acknowledgements Channel Quality Indicator (CQI) Precoding Matrix Indicator (PMI) Rank Indicator (RI) Scheduling Requests (SR)	UL
DCI	R8	Downlink control information	Downlink scheduling commands Uplink scheduling grants Uplink power control commands	DL
CFI	R8	Control format indicator	Control region size	DL
HI	R8	Hybrid ARQ indicator	Hybrid ARQ acknowledgements	DL

Πίνακας 3.13: Control information

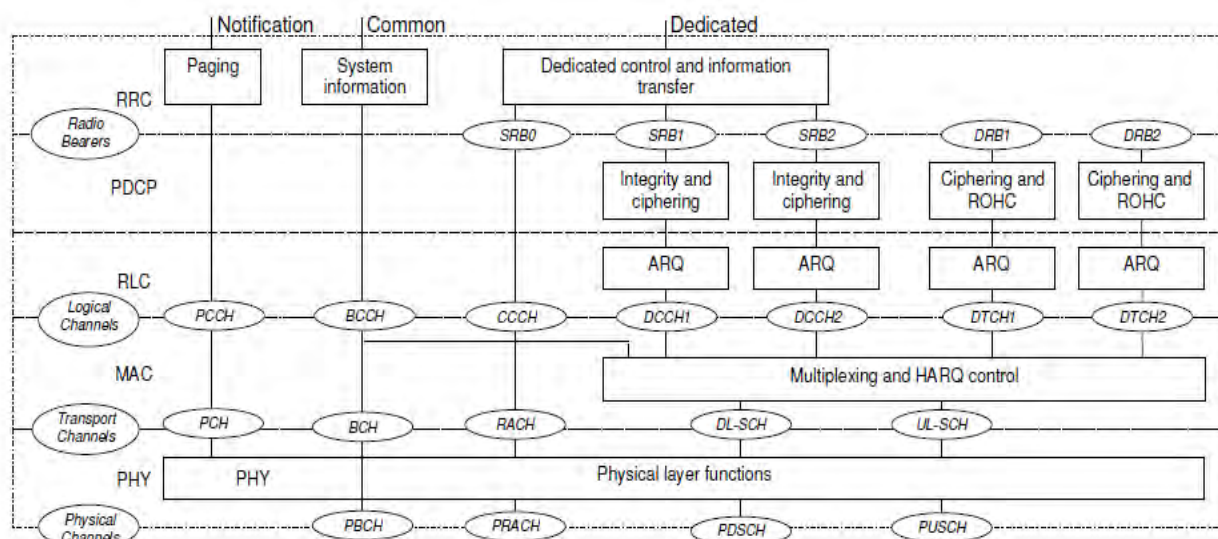
Τα φυσικά κανάλια ελέγχου που χρησιμοποιούνται από το LTE είναι τα εξής:

- *Physical Downlink Control CHannel (PDCCH)*: είναι κανάλι κατερχόμενης ζεύξης και χρησιμοποιείται για τη μεταφορά της πληροφορίας **DCI** (Downlink Control Information) η οποία είναι απαραίτητη για την αποδιαμόρφωση και την αποκωδικοποίηση του καναλιού PDSCH. Για κάθε PDSCH αντιστοιχεί και ένα PDCCH.
- *Physical Control Format Indicator CHannel (PCFICH)*: μεταφέρει την πληροφορία ελέγχου **CFI** (Control Format Indicator) στην κατερχόμενη ζεύξη που απαιτείται για την αποκωδικοποίηση του PDCCH.
- *Physical Hybrid-ARQ Indicator CHannel (PHICH)*: μεταφέρει τον δείκτη HARQ (HARQ Indicator - **HI**) το περιεχόμενο του οποίου υποδηλώνει αν ο σταθμός βάσης έχει λάβει σωστά μία μετάδοση του καναλιού PUSCH. Ο δείκτης λαμβάνει τιμή 1 για αρνητική απάντηση (NACK) και 0 για θετική (ACK).
- *Physical Uplink Control CHannel (PUCCH)*: χρησιμοποιείται για την αποστολή της πληροφορίας ελέγχου **UCI** (Uplink Control Information) στο σταθμό βάσης.

Channel	Release	Name	Information	Direction
PUCCH	R8	Physical uplink control channel	UCI	UL
PCFICH	R8	Physical control format indicator channel	CFI	DL
PHICH	R8	Physical hybrid-ARQ channel	HI	DL
PDCCH	R8	Physical downlink control channel	DCI	DL

Πίνακας 3.14: Φυσικά κανάλια ελέγχου στο LTE

Το σχήμα 3.21 απεικονίζει τη αρχιτεκτονική των επιπέδων L1, L2 και L3 και τη χρήση των logical, transport και physical καναλιών.



Σχήμα 3.21: Αρχιτεκτονική διεπαφής αέρα

3.10.4 Channel mapping

Η υλοποίηση της αρχιτεκτονικής των πρωτοκόλλων του ασύρματου μέσου βασίστηκε στην αποτελεσματική ροή της πληροφορίας διαμέσω των επιπέδων με τη χρήση του μικρότερου δυνατού αριθμού μετάδοσης. Το γεγονός αυτό αντικατοπτρίζεται μέσα από τη μείωση των αποκλειστικών καναλιών (dedicated channels), την αντικατάστασή τους από κοινά κανάλια (shared channels) και την αύξηση του αριθμού των φυσικών καναλιών. Στις ενότητες που ακολουθούν περιγράφεται η συσχέτιση ανάμεσα σε όλους τους τύπους καναλιών που υποστηρίζει το LTE για τη μετάδοση των user plane και control plane δεδομένων. Η αντιστοίχιση διαφοροποιείται ανάλογα με την κατεύθυνση της ζεύξης.

3.10.4.1 Downlink channel mapping

Στην κατερχόμενη ζεύξη έχουμε μόνο ένα λογικό κανάλι κίνησης (**DTCH**) και τέσσερα λογικά κανάλια ελέγχου **CCCH**, **DCCH**, **BCCH** και **PCCH**. Τα λογικά κανάλια DTCH, CCCH, DCCH και οι πληροφορίες συστήματος SIBs του BCCH πολυπλέκονται μεταξύ τους στο MAC layer και δημιουργούν το κοινό κανάλι μεταφοράς **DL-SCH**. Το κανάλι **BCCH** αντιστοιχεί στο κανάλι **BCH** για τη μεταφορά των πληροφοριών συστήματος MIB ενώ το **PCCH** στο αντίστοιχο **PCH**.

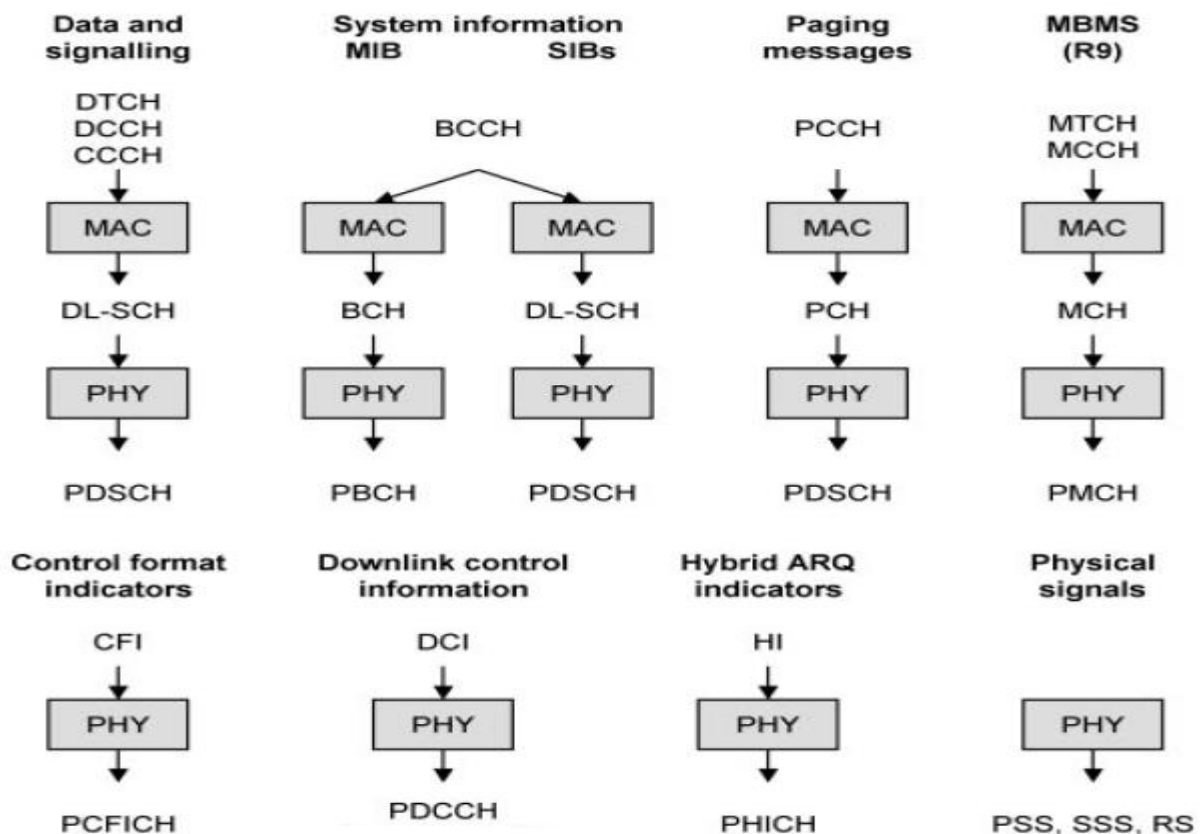
Έπειτα το **DL-SCH** συνδυάζεται με το **PCH** και από κοινού σχηματίζουν το φυσικό κανάλι δεδομένων **PDSCH** καθώς στο φυσικό επίπεδο δεν υπάρχει αντίστοιχο κανάλι paging. Το transport κανάλι **BCH** μεταβιβάζει την πληροφορία MIB στο φυσικό κανάλι **PBCH**.

Στην περίπτωση υπηρεσιών MBMS υποστηρίζονται ένα λογικό κανάλι κίνησης **MTCH** και ένα λογικό κανάλι ελέγχου **MCCH**. Τα MTCH και MCCH πολυπλέκονται στο MAC layer και προκύπτει το κανάλι μεταφοράς **MCH**. Έπειτα το MCH μεταβιβάζει τα δεδομένα στο φυσικό κανάλι **PMCH**.

Εκτός των φυσικών καναλιών PDSCH, PBCH και PMCH υπάρχουν και τα φυσικά κανάλια ελέγχου **PDCCH**, **PHICH** και **PCFICH**. Χρησιμοποιούνται για τη μεταφορά των πληροφοριών DCI, HI και CFI για τον έλεγχο της χαμηλού επιπέδου του Physical layer. Τα κανάλια αυτά είναι ορατά μόνο από το φυσικό επίπεδο και επομένως δεν αντιστοιχούν σε κάποιο κανάλι μεταφοράς. Συνηθίζεται να ονομάζονται και ως κανάλια ελέγχου **L1/L2**.

Στο κανάλι PDSCH εκτός από τα δεδομένα του χρήστη και της σηματοδότησης ενσωματώνονται φυσικά σήματα συγχρονισμού (**PSS, SSS**) και αναφοράς (**RSs**). Τα φυσικά σήματα παράγονται από το Physical channel processing και συντελούν στον έλεγχο της λειτουργίας του φυσικού επιπέδου. Η χρήση του περιορίζεται μόνο στο physical layer και δεν μεταφέρουν καμία πληροφορία από τα ανώτερα στρώματα.

Το σχήμα 3.22 απεικονίζει την αντιστοιχία μεταξύ logical, transport και physical καναλιών στην κατερχομένη ζεύξη, τη ροή της πληροφορίας ελέγχου και τα φυσικά σήματα του Physical layer.



Σχήμα 3.22: Downlink channel mapping

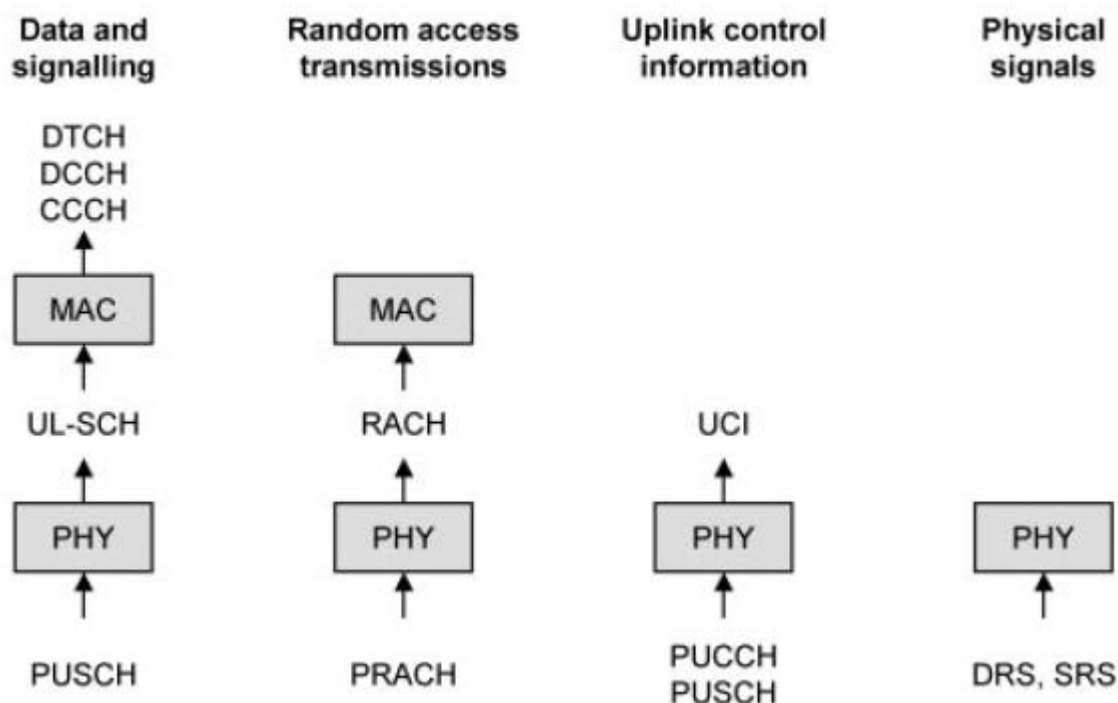
3.10.4.2 Uplink channel mapping

Στην ανερχόμενη ζεύξη έχουμε ένα λογικό κανάλι κίνησης **DTCH** και δύο λογικά κανάλια ελέγχου **CCCH** και **DCCH**. Και τα τρία αυτά κανάλια πολυπλέκονται στο επίπεδο MAC και σχηματίζουν το κανάλι μεταφοράς **UL-SCH** το οποίο στη συνέχεια αντιστοιχεί στο φυσικό κανάλι **PUSCH**. Το κανάλι μεταφοράς **RACH** μεταβιβάζει την πληροφορία στο φυσικό κανάλι **PRACH**.

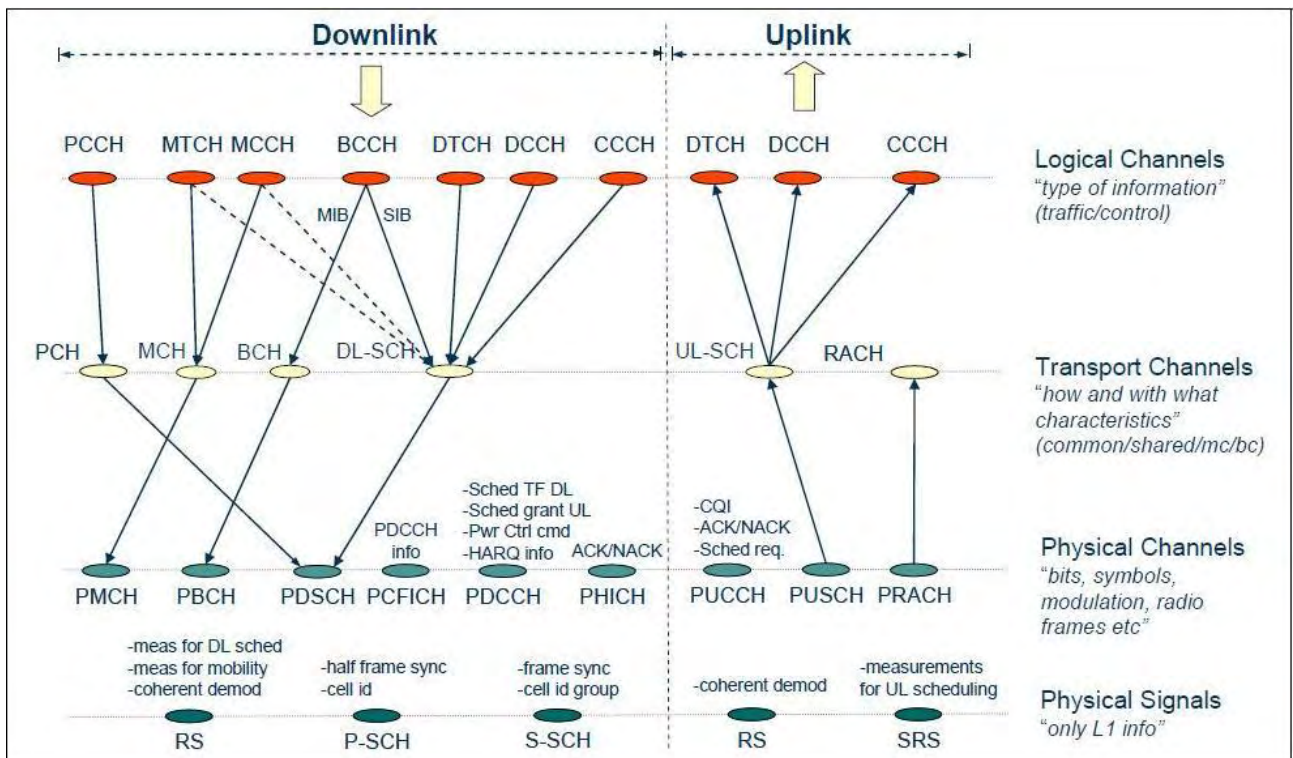
Το φυσικό κανάλι ελέγχου **PUCCH** μεταφέρει την πληροφορία UCI. Δεν αντιστοιχεί σε κάποιο κανάλι μεταφοράς και η χρήση του περιορίζεται μόνο μέσα στο φυσικό επίπεδο.

Το LTE στην περίπτωση του uplink ορίζει τα σήματα αναφοράς **DM-RS** (Demodulation Reference Signal) και **SRSs** (Sounding Reference Signals) τα οποία ενσωματώνονται στα φυσικά κανάλια PUSCH και PUCCH.

Στο σχήμα 3.23 παρουσιάζεται η συσχέτιση μεταξύ των logical, transport και physical καναλιών και τα φυσικά σήματα αναφοράς στην περίπτωση της ανερχομένης ζεύξης.



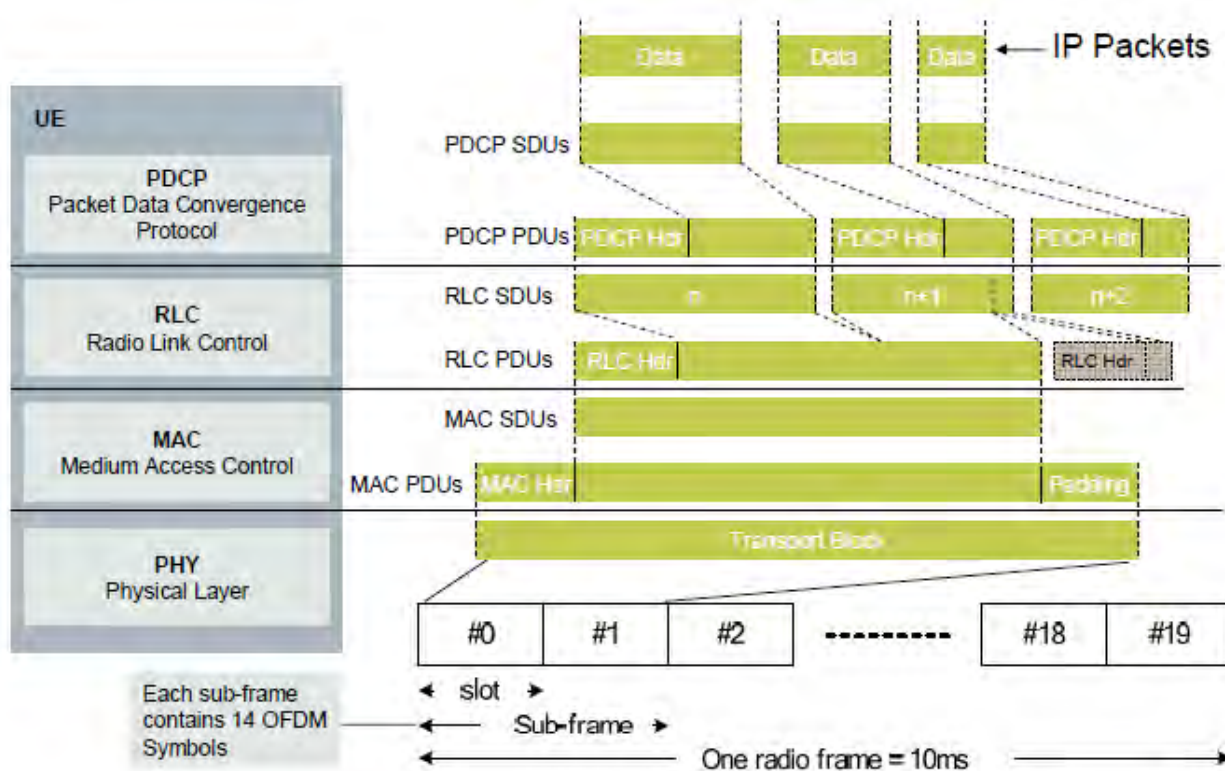
Σχήμα 3.23: Uplink channel mapping



Σχήμα 3.24: Downlink and Uplink channel mapping

3.11 Μετάδοση δεδομένων στο PDSCH

Το φυσικό επίπεδο αναλαμβάνει τη μετατροπή των πακέτων δεδομένων σε σήμα κατάλληλο προς μετάδοση στο ασύρματο μέσο για την επικοινωνία ανάμεσα στη συσκευή και το σταθμό βάσης. Το σχήμα 3.25 παρουσιάζει τη ροή των downlink πακέτων μεταξύ των επιπέδων PDCP, RLC και MAC και την οργάνωσή τους σε χρονοθυρίδες και υποπλαίσια στο πεδίο του χρόνου στο physical layer.



Σχήμα 3.25: LTE μετάδοση κατερχόμενης ζεύξης στο πεδίο του χρόνου

Στην κατερχόμενη ζεύξη κάθε επίπεδο λαμβάνει ως είσοδο ένα πακέτο δεδομένων υπό τη μορφή **SDU** (Service Data Unit) από το ανώτερο επίπεδο στο οποίο παρέχει υπηρεσίες, το επεξεργάζεται και προκύπτει ένα **PDU** (Protocol Data Unit) που προωθεί στο αμέσως χαμηλότερο επίπεδο της αρχιτεκτονικής.

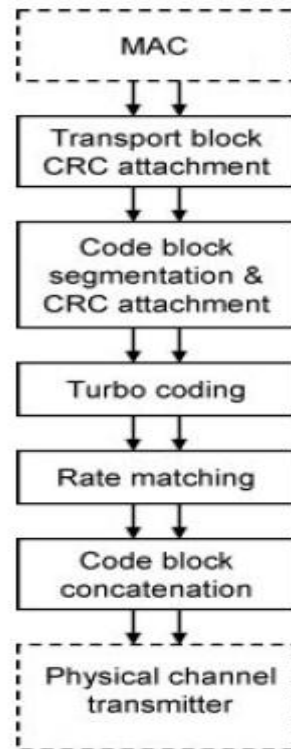
Το PDCP layer δέχεται τα IP πακέτα ως **PDCP SDUs** και μετά από επεξεργασία προωθεί στο RLC τα **PDCP PDUs**. Τα πακέτα εισόδου του RLC ονομάζονται PDCP PDUs από την οπτική του PDCP επιπέδου και **RLC SDUs** από την οπτική του RLC επιπέδου. Το RLC με τη σειρά του μεταβιβάζει τα **RLC PDUs** στο MAC layer. Το επίπεδο MAC αφού προβεί στις κατάλληλες ενέργειες προωθεί τα **MAC PDUs** στο Physical layer. Το φυσικό επίπεδο λαμβάνει τα MAC PDUs υπό τη μορφή **Transport Blocks**. Ένα TB αντιστοιχεί σε ένα υποπλάισιο και έχει διάρκεια 1ms. Η επεξεργασία των TBs και η οργάνωσή τους στο πεδίο του χρόνου διεξάγεται

σταδιακά. Το φυσικό επίπεδο αποτελείται από τρία τμήματα με διακριτούς ρόλους το καθένα. Το **Transport channel processing** ασχολείται με τις τεχνικές διαχείρισης σφαλμάτων, το **Physical channel processing** με τις τεχνολογίες OFDMA, SC-FDM και MIMO και το **Analogue processing** με τη μετατροπή των συμβόλων σε αναλογικό σήμα το οποίο θα μεταδοθεί σε μία κεντρική φέρουσα συχνότητα στο ασύρματο κανάλι.

3.11.1 Transport channel processing

Το σχήμα 3.26 απεικονίζει τα στάδια επεξεργασίας στο τμήμα του Transport channel processing.

Το φυσικό επίπεδο λαμβάνει τα δεδομένα από το επίπεδο MAC υπό τη μορφή **Transport Blocks**. Η διάρκεια μετάδοσης ενός TB είναι 1ms ενώ το μέγεθός του καθορίζεται στην πληροφορία ελέγχου DCI του PDCCH. Συνήθως ο σταθμός βάσης μεταδίδει ένα TB τη φορά σε κάθε υποπλαίσιο. Στην περίπτωση της χωρικής πολυπλεξίας (spatial multiplexing) μπορεί να αποσταλούν ένα ή δύο TBs ανά υποπλαίσιο. Πρωταρχική ενέργεια του Transport channel processing είναι η προσθήκη ενός 24-bit **CRC** σε κάθε Transport Block. Ακολουθεί η κατάτμηση του TB σε **Code Blocks** μεγέθους 6144 bits και η προσθήκη CRC σε κάθε Code Block ξεχωριστά. Στη συνέχεια λαμβάνει χώρα η διαδικασία της κωδικοποίησης η οποία συντελείται σε δύο στάδια. Στο πρώτο στάδιο χρησιμοποιείται κωδικοποίηση **Turbo** με σταθερό ρυθμό 1/3 για κάθε Code Block. Το δεύτερο στάδιο ονομάζεται **rate matching** σύμφωνα με το οποίο μόνο ένα υποσύνολο των κωδικοποιημένων bits επιλέγεται για μετάδοση ενώ τα υπόλοιπα απορρίπτονται με χρήση της τεχνικής puncturing. Ο σκοπός του rate matching είναι η προσαρμογή του ρυθμού κωδικοποίησης στις απαιτήσεις της μετάδοσης. Ο αριθμός των επιλεγμένων bits καθορίζεται από την κατανομή των πόρων και η επιλογή τους προσδιορίζεται από το redundancy version. Η διαδικασία του Transport channel processing ολοκληρώνεται με την σύνεση των Code Blocks και τη δημιουργία κωδικών λέξεων (**codewords**) οι οποίες προωθούνται στο επίπεδο Physical channel processing.



Σχήμα 3.26: Transport channel processing στην κατερχόμενη ζεύξη

3.11.2 Physical channel processing

Το Physical channel processing λαμβάνει τα δεδομένα από το Transport channel processing υπό τη μορφή **codewords**. Το πρώτο στάδιο επεξεργασίας είναι το **scrambling** όπου κάθε codeword αναμειγνύεται με μία ψευδοτυχαία ακολουθία η οποία εξαρτάται από την φυσική ταυτότητα της κυψέλης (physical cell ID) και το προσωρινό αναγνωριστικό RNTI (Radio Network Temporary Identifier).

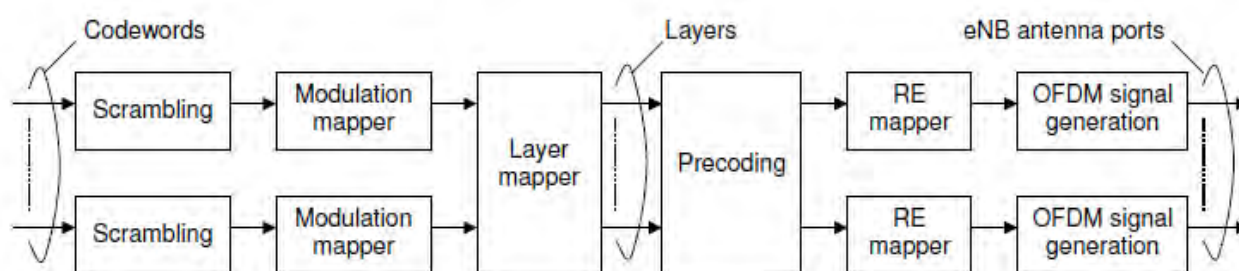
Το δεύτερο στάδιο είναι η **διαμόρφωση** των scrambled bits και η δημιουργία των complex valued συμβόλων. Ανάλογα με τον τύπο της διαμόρφωσης **QPSK**, **16-QAM** ή **64-QAM** το κάθε σύμβολο αντιστοιχεί σε δύο, τέσσερα ή έξι bits αντίστοιχα. Τα επόμενα στάδια σχετίζονται με τη χρήση πολλαπλών κεραιών. Ο σταθμός eNodeB με βάση τις μετρήσεις που λαμβάνει από τη συσκευή (CQI, PMI, RI) διαμορφώνει τις παραμέτρους της μετάδοσης και επιλέγει την κατάλληλη τεχνική MIMO. Ο δείκτης **RI** (Rank Indicator) αφορά το layer mapping και υποδηλώνει τον αριθμός των επιπέδων μετάδοσης (transmission layers) που θα χρησιμοποιηθούν ή αλλιώς τον αριθμό των ανεξάρτητων ροών δεδομένων για την τεχνική της χωρικής πολυπλεξίας. Ο δείκτης **PMI** (Precoding Matrix Indicator) σχετίζεται με το στάδιο του Precoding και αποτελεί μία ένδειξη για τον προτιμώμενο precoding matrix που θα χρησιμοποιήσει ο σταθμός βάσης για τις επικρατούσες συνθήκες του καναλιού της κατερχόμενης ζεύξης. Ο **layer mapper** ανάλογα με την τιμή του RI καθορίζει την αντιστοιχία των codewords σε ένα έως τέσσερα ανεξάρτητα layers, ενώ ο

precoder είναι υπεύθυνος για την εφαρμογή του precoding matrix και την αντιστοίχιση των layers σε διαφορετικές θύρες κεραιών.

Έπειτα ακολουθεί το **resource element mapping** για κάθε θύρα κεραίας. Αρχικά πραγματοποιείται η μετατροπή της σειριακής ροής των complex valued διαμορφωμένων συμβόλων σε παράλληλες υποροές μέσω του S/P converter ώστε κάθε υποροή να αντιστοιχισθεί σε επιλεγμένες υποφέρουσες. Οι υποροές προκύπτουν από τα δεδομένα του χρήστη PDSCH, των καναλιών ελέγχου PDCCH, PCFICH, PHICH και των φυσικών σημάτων και καταλαμβάνουν συγκεκριμένα Resource Elements (REs) στο Resource Grid.

Εφόσον ολοκληρωθεί το resource element mapping το επόμενο στάδιο είναι η δημιουργία του OFDM συμβόλου μέσα από την εφαρμογή του **αντίστροφου FFT**, την εισαγωγή του κυκλικού προθέματος (normal ή extended) και τη μετατροπή παράλληλου προς σειριακό (P/S converter). Το τελικό στάδιο είναι η αντιστοίχιση των OFDM συμβόλων στις θύρες κεραιών για τη μετάδοσή τους στο ασύρματο κανάλι.

Η διαδικασία του Physical channel processing για την κατερχόμενη ζεύξη απεικονίζεται στο σχήμα 3.27.



Σχήμα 3.27: Physical channel processing στην κατερχόμενη ζεύξη

3.12 LTE Resource grid

Η δημιουργία του OFDM συμβόλου προϋποθέτει την αναπαράσταση των δεδομένων στο πεδίο του χρόνου και της συχνότητας υπό τη μορφή του resource grid. Το resource grid ουσιαστικά είναι ένας πίνακας με στοιχεία τα complex valued διαμορφωμένα σύμβολα που προκύπτουν από τη διαδικασία του physical channel processing. Στην περίπτωση της μετάδοσης μονής κεραίας (single antenna transmission) το resource grid είναι διδιάστατος χώρος με τον άξονα x να αναπαριστά τα OFDM σύμβολα στο χρόνο και τον άξονα y να απεικονίζει τις υποφέρουσες στη συχνότητα.

Η οργάνωση στη **διάσταση του χρόνου** πραγματοποιείται μέσα από τις δομές του **πλαισίου**, του **υποπλαίσιου** και της **χρονοθυρίδας**. Ένα LTE πλαίσιο έχει διάρκεια 10ms και υποδιαιρείται σε 10 υποπλάγια του 1ms με αρίθμηση από 0 έως 9. Κάθε υποπλάσιο αποτελείται από 2 χρονοθυρίδες των 0.5ms με την κάθε χρονοθυρίδα να περιλαμβάνει 7 OFDM σύμβολα στην περίπτωση του κανονικού κυκλικού προθέματος ή 6 στην περίπτωση του εκτεταμένου.

Η οργάνωση στη **διάσταση της συχνότητας** προκύπτει μέσα από τις δομές του **υποφορέα** και του **Resource Block**. Ένα RB συγκροτείται από 12 υποφορείς με απόσταση 15kHz μεταξύ τους και έχει διάρκεια μίας χρονοθυρίδας 0.5ms. Ο αριθμός των διαδοχικών RBs καθορίζει το εύρος ζώνης του καναλιού μετάδοσης και κυμαίνεται από 6 έως 100.

Το υποπλάσιο και το Resource Block είναι τα δομικά στοιχεία του resource grid καθώς συμβάλλουν στη διαδικασία του χρονοπρογραμματισμού των πόρων. Το **RB** επιτελεί τον **προγραμματισμό των πόρων** στη συχνότητα μέσω της απεικόνισης των δεδομένων των φυσικών καναλιών και σημάτων στους κατάλληλους υποφορείς. Το **υποπλάσιο** χρησιμοποιείται για την **οργάνωση του χρονοδιαγράμματος** αφού ο προγραμματισμός των συμβόλων πληροφορίας πραγματοποιείται ένα υποπλάσιο κάθε φορά.

Το resource element είναι η μικρότερη δυνατή μονάδα απεικόνισης στο resource grid. Αντιστοιχεί σε ένα OFDM σύμβολο στο χρόνο και σε έναν υποφορέα στη συχνότητα. Αποτελείται από δύο, τέσσερα ή έξι bits ανάλογα με τον τύπο της διαμόρφωσης.

Στο σημείο αυτό προκύπτουν τα εξής σημαντικά ερωτήματα:

- Τι είδους πληροφορία αντιπροσωπεύει ένα RE;
- Με ποιον τρόπο οργανώνονται τα REs στο Resource grid;
- Πώς μεταβάλλεται η δομή του Resource grid σε χρονικό διάστημα ενός πλαισίου;

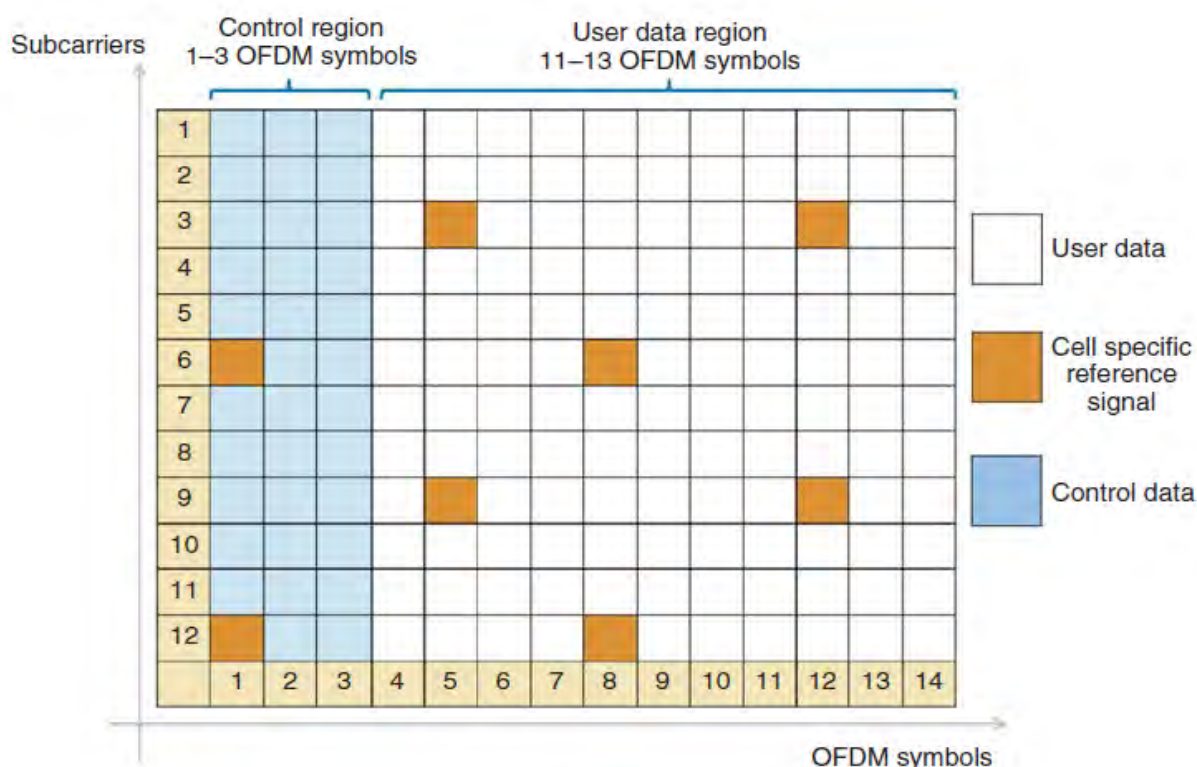
Η απάντηση στο πρώτο ερώτημα προέρχεται από τον τύπο των φυσικών καναλιών και των φυσικών σημάτων που χρησιμοποιούνται στο LTE. Υπάρχουν **τρία είδη πληροφοριών** που αναπαρίστανται στο resource grid. Ένα RE μπορεί να περιέχει το διαμορφωμένο σύμβολο είτε των δεδομένων του χρήστη, είτε των **φυσικών σημάτων συγχρονισμού** ή **αναφοράς** είτε **πληροφοριών ελέγχου**. Επομένως η δομή του resource grid για την κατερχόμενη ζεύξη στο LTE συντίθεται από τα εξής δεδομένα:

- User data του **PDSCH**
- Τα σήματα αναφοράς (Cell-Specific Reference Signals - **CSRs**)
- Το πρωτεύον σήμα συγχρονισμού (Primary Synchronization Signal - **PSS**)
- Το δευτερεύον σήμα συγχρονισμού (Secondary Synchronization Signal - **PSS**)

- Τα δεδομένα του φυσικού καναλιού **PBCH**
- Πληροφορίες ελέγχου **DCI**, **CFI** και **HI** των καναλιών PDCCH, PCFICH και PHICH

Η απάντηση στο δεύτερο ερώτημα καθορίζει την οργάνωση όλων των προαναφερθέντων τύπων δεδομένων στο resource grid. Το πλήθος των REs που περιέχει το resource grid υπολογίζεται από τον συνολικό αριθμός των RBs του φάσματος και τον αριθμό των OFDM συμβόλων του υποπλαισίου. Κάθε RE αναπαριστά έναν από τους έξι διαφορετικούς τύπους πληροφορίας: user data, CSRs, PSS, SSS, PBCH, DCI, CFI ή HI. Ο αριθμός των REs και η θέση τους στο resource grid εξαρτώνται από την πληροφορία που μεταφέρουν και είναι καθοριστικής σημασίας για την αξιόπιστη μετάδοση και επικοινωνία του σταθμού βάσης με τη συσκευή καθώς αποκαλύπτουν τις σχεδιαστικές παραμέτρους του συστήματος.

Κάθε ένας τύπος πληροφορίας απαιτεί διαφορετικό πλήθος από REs, ακολουθεί ξεχωριστή κατανομή υποφορέων στη συχνότητα και καταλαμβάνει συγκεκριμένα OFDM σύμβολα στο χρόνο. Παραδείγματος χάρη τα μηνύματα ελέγχου DCI, CFI και HI μεταφέρουν σημαντικές παραμέτρους (τύπος διαμόρφωσης, τρόπος μετάδοσης κ.α) οι οποίες είναι απαραίτητες για τη λήψη και την αποκωδικοποίηση του PDSCH. Συνεπώς είναι ανάγκη να τοποθετούνται πάντα στην αρχή κάθε υποπλαισίου και να αποκωδικοποιούνται πριν από το PDSCH. Στο σχήμα 3.28 παρουσιάζεται η δομή του downlink resource grid.

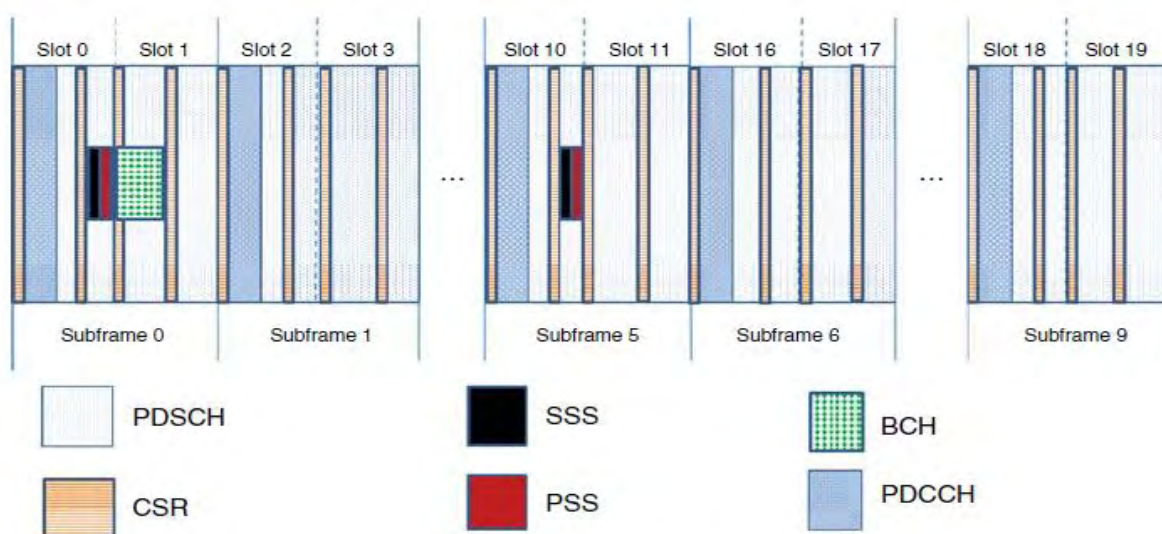


Σχήμα 3.28: LTE downlink subframe

Το resource grid σε κάθε υποπλαίσιο αποτελείται από την περιοχή ελέγχου (**control region**) και την περιοχή των δεδομένων (**user data region**). Η περιοχή ελέγχου περιέχει τις πληροφορίες DCI, CFI και HI. Σε κάθε υποπλαίσιο προηγείται της περιοχής των δεδομένων, εκτείνεται σε όλο το διαθέσιμο φάσμα και το μέγεθός της κυμαίνεται από 1 έως 3 OFDM σύμβολα στο πεδίο του χρόνου.

Η απάντηση στο τελευταίο ερώτημα προκύπτει από την μεταβολή και την αναδιαμόρφωση του resource grid μέσα στο χρονικό διάστημα του LTE πλαισίου. Η διάταξη του κάθε διαμορφωμένου συμβόλου (user data, CSRs, PSS, SSS, PBCH, DCI, CFI και HI) στο resource grid ακολουθεί μία καθορισμένη δομή. Η δομή αυτή προσδιορίζεται από τρεις παραμέτρους: τον **δείκτη θέσης του υποφορέα** στη συχνότητα, τον **δείκτη θέσης του OFDM συμβόλου** στο χρόνο και τον **δείκτη θέσης του υποπλαισίου** στο LTE πλαίσιο. Με βάση τις παραμέτρους αυτές αναπαριστούμε όλους τους τύπους δεδομένων σε κάθε υποπλαίσιο και διαμορφώνουμε το resource grid σε όλο το πλαίσιο ως εξής:

- Όλα τα **υποπλάγια** με αρίθμηση **από 0 έως 9** περιέχουν τα δεδομένα του PDSCH, τα σήματα αναφοράς CSRs και τις πληροφορίες DCI, CFI και HI.
- Τα σήματα συγχρονισμού **PSS** και **SSS** τοποθετούνται μόνο στα **υποπλάγια 0 και 5** στα **OFDM σύμβολα με δείκτη θέσης 6 και 5** αντίστοιχα και κατανέμονται στους **72 κεντρικούς υποφορείς** γύρω από τον dc υποφορέα.
- Τα δεδομένα του **PBCH** εμπεριέχονται μόνο στο **υποπλαίσιο 0**, δεσμεύουν τέσσερα διαδοχικά **OFDM σύμβολα στις θέσεις 7 έως 10** και κατανέμονται σε **72 υποφορείς** στο κέντρο του resource grid.



Σχήμα 3.29: Downlink FDD πλαίσιο μετάδοσης στο LTE

3.13 Διαμόρφωση του downlink resource grid

Σε κάθε υποπλαίσιο το μέγεθος του resource grid N_{total} υπολογίζεται από τον συνολικό αριθμό των υποφορέων της κατερχόμενης ζεύξης N_{sc}^{DL} και από το πλήθος των OFDM συμβόλων του υποπλαισίου N_{symb} σύμφωνα με τον παρακάτω τύπο:

$$N_{total} = N_{sc}^{DL} * N_{symb} \quad (3.21)$$

Οι παράμετροι N_{sc}^{DL} και N_{symb} προκύπτουν ως εξής:

$$N_{sc}^{DL} = N_{RB} * N_{sc}^{RB} \quad (3.22)$$

$$N_{symb} = N_{slot} * N_{symb}^{slot} \quad (3.23)$$

Όπου:

N_{sc}^{RB} : ο αριθμός των υποφορέων ενός Resource Block

N_{slot} : ο αριθμός των χρονοθυρίδων ενός υποπλαισίου

N_{symb}^{slot} : ο αριθμός των OFDM συμβόλων σε μία χρονοθυρίδα

Με αντικατάσταση των τύπων (3.22) και (3.23) στο τύπο (3.21) προκύπτει ότι:

$$N_{total} = N_{RB} * N_{sc}^{RB} * N_{slot} * N_{symb}^{slot} \quad (3.24)$$

Η τιμές των παραμέτρων N_{sc}^{RB} και N_{symb}^{slot} καθορίζονται από το κυκλικό πρόθεμα. Για όλη την περαιτέρω ανάλυση θεωρούμε τη χρήση κανονικού κυκλικού προθέματος οπότε $N_{sc}^{RB} = 12$ subcarriers και $N_{symb}^{slot} = 7$ OFDM σύμβολα. Η τιμή του N_{slot} είναι σταθερή και ίση με 2 χρονοθυρίδες σε κάθε υποπλαίσιο. Συνεπώς ο τύπος 3.24 απλοποιείται στη μορφή:

$$N_{total} = a * N_{RB} \quad (3.25)$$

Όπου:

$$a = N_{sc}^{RB} * N_{slot} * N_{symb}^{slot} = 12 * 2 * 7 = 168$$

Ο τύπος 3.25 μας υποδεικνύει ότι το μέγεθος του resource grid είναι σταθερό σε κάθε υποπλαίσιο και ευθεία συνάρτηση του εύρους ζώνης του καναλιού αφού εξαρτάται μόνο από τον αριθμό των Resource Blocks. Όπως αναφέραμε το resource grid απαρτίζεται από έξι διαφορετικούς τύπους πληροφοριών. Κάθε τύπος τοποθετείται σε συγκεκριμένα υποπλαίσια. Το PDSCH, τα σήματα CSRs και πληροφορίες ελέγχου DCI, CFI και HI βρίσκονται σε όλα τα υποπλαίσια, τα σήματα συγχρονισμού PSS και SSS στα υποπλαίσια 0 και 5 και το PBCH μόνο στο

υποπλαίσιο 0. Επομένως ο υπολογισμός και η απεικόνιση των συμβόλων τους για κάθε υποπλαίσιο του LTE πλαισίου διακρίνεται σε τρεις περιπτώσεις:

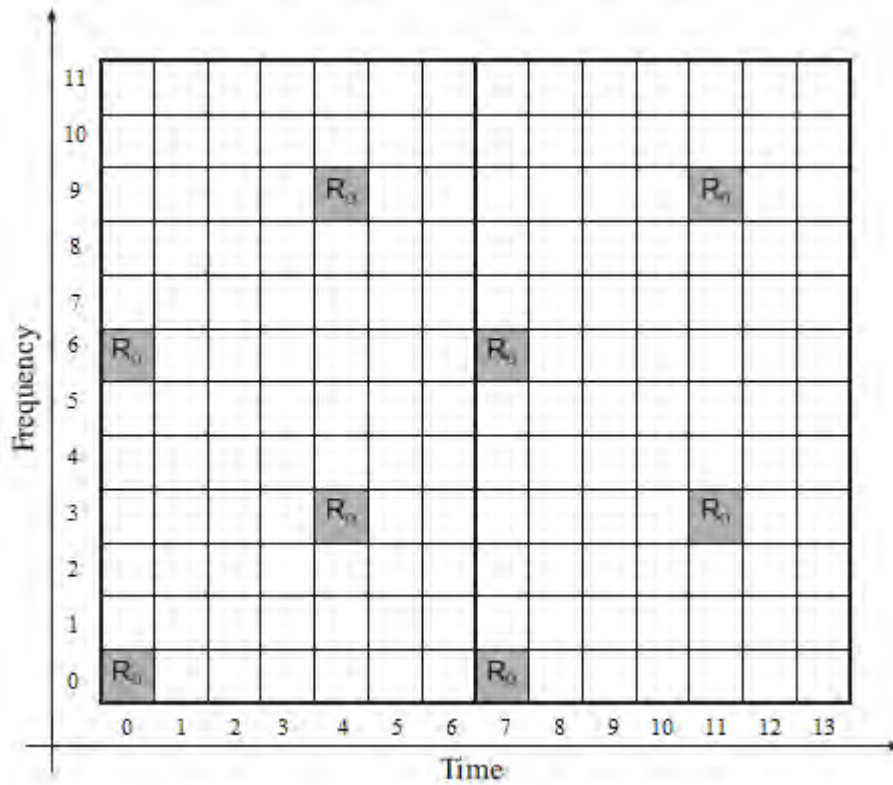
1. **Υποπλαίσιο 0:** υπολογισμών όλων των τύπων συμβόλων
2. **Υποπλαίσιο 5:** υπολογισμός μόνο των συμβόλων user data, CSRs, PSS, SSS, DCI, CFI και HI
3. **Υποπλάισια {1, 2, 3, 4, 6, 7, 8, 9}:** υπολογισμός μόνο των συμβόλων user data, CSRs, DCI, CFI και HI.

3.13.1 CSR resource element mapping

Τα σήματα αναφοράς **CSRs** (Cell Specific Reference Signals) παρέχουν ένα **πλάτος** και μία **φάση αναφοράς** τα οποία χρησιμοποιούνται από τη συσκευή για την εκτίμηση του καναλιού (**channel estimation**) και την **αποδιαμόρφωση** των downlink καναλιών ελέγχου και των δεδομένων του καναλιού PDSCH στους τρόπους μετάδοσης 1 έως 6.

Τα CSRs τοποθετούνται σε κάθε Resource Block σε κάθε υποπλαίσιο του LTE πλαισίου ακολουθώντας ένα καθορισμένο μοτίβο στο χρόνο και τη συχνότητα. Η απεικόνισή τους εξαρτάται από τον αριθμό των θυρών των κεραιών (antenna ports) και από τον αριθμό της θύρας κεραίας (antenna port number). Στην περίπτωση μονής κεραίας και κανονικού προθέματος υπάρχουν 4 CSRs σύμβολα σε κάθε Resource Block του υποπλαισίου στα **OFDM σύμβολα 0, 4, 7 και 11**. Τα OFDM σύμβολα 0 και 7 αντιστοιχούν στην πρώτη υποφέρουσα του RB με δείκτη θέσης 0 ενώ τα OFDM σύμβολα 4 και 11 στην τέταρτη υποφέρουσα με δείκτη θέσης 3. Στο πεδίο της συχνότητας η απόσταση ανάμεσα σε 2 CSRs σύμβολα του ίδιου OFDM συμβόλου είναι ίση με 6 υποφέρουσες.

Το σχήμα 3.30 απεικονίζει τη διάταξη των CSRs συμβόλων στο resource grid στην περίπτωση κανονικού κυκλικού προθέματος για μία θύρα κεραίας.



Σχήμα 3.30: CSRs resource element mapping (normal CP, one antenna port)

Εφόσον το μοτίβο διάταξης επαναλαμβάνεται στο πεδίο του χρόνου και της συχνότητας ο συνολικός αριθμός των CSRs συμβόλων στο resource grid υπολογίζεται ως εξής:

$$N_{CSR} = 2 * N_{RB}^{DL} * 4 = 8 * N_{RB}^{DL} \quad (3.26)$$

Ο αριθμός των CSRs συμβόλων N_{CSR} παραμένει σταθερός σε κάθε υποπλαίσιο και εξαρτάται αποκλειστικά από το φάσμα μετάδοσης N_{RB}^{DL} . Το πλήθος των CSRs συμβόλων για ολόκληρο το LTE πλαίσιο είναι:

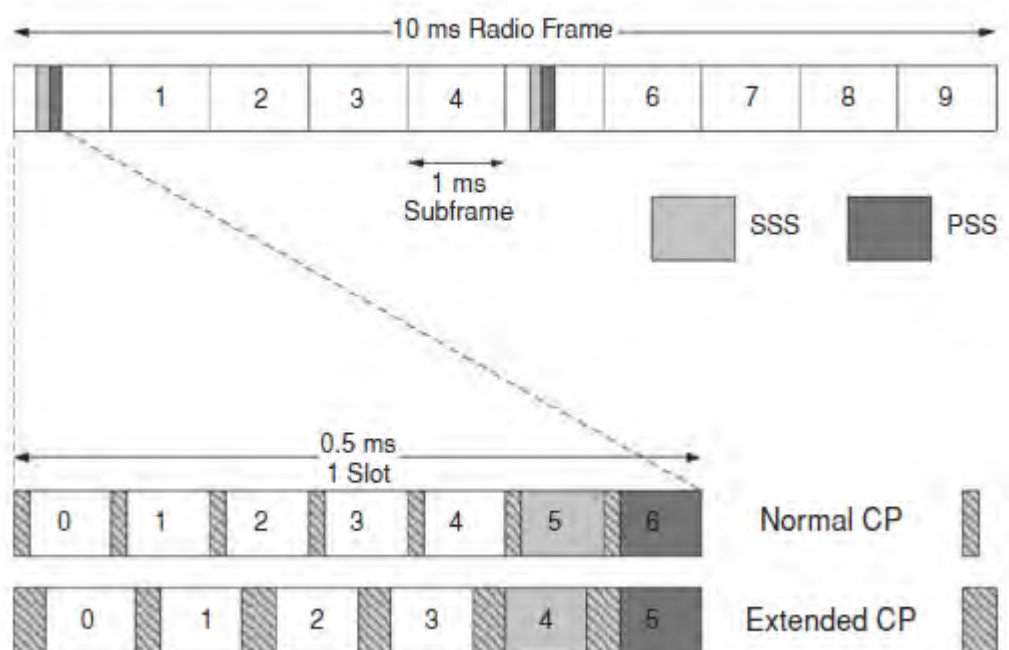
$$N_{CSR_frame} = N_{CSR} * 10 \quad (3.27)$$

Παραδείγματος χάρη στην περίπτωση του καναλιού **1.4MHz** με $N_{RB}^{DL} = 6$ έχουμε **$N_{CSR} = 48$** και **$N_{CSR_frame} = 480$** .

3.13.2 PSS / SSS resource element mapping

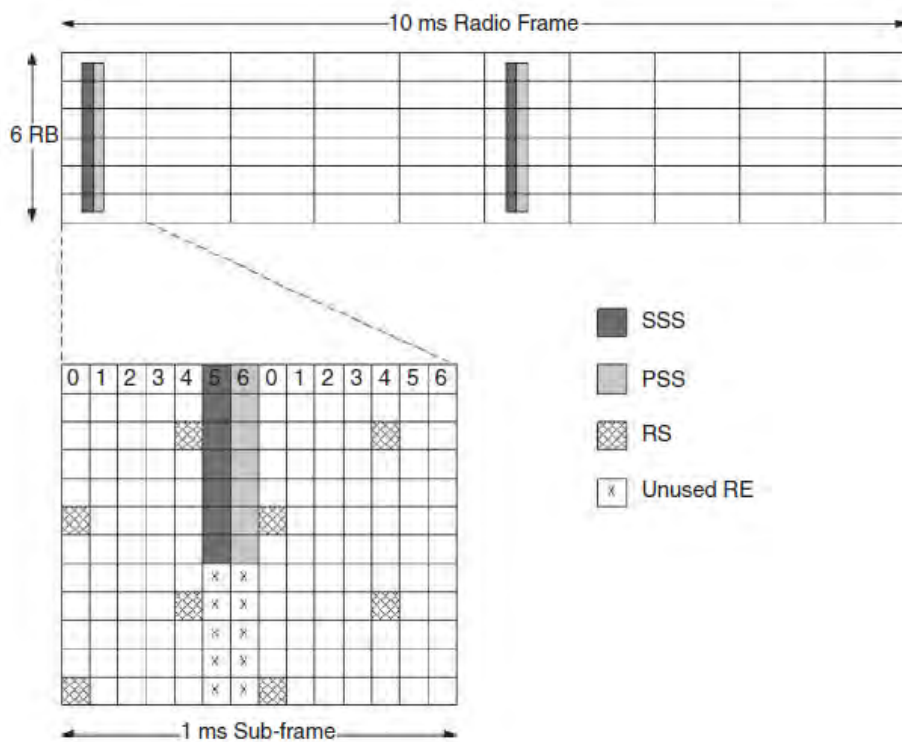
Χάρη στα σήματα **PSS / SSS** η συσκευή επιτυγχάνει το **συγχρονισμό στο χρόνο και τη συχνότητα**. Τα σήματα συγχρονισμού χρησιμοποιούνται σε διαδικασίες όπως η αναζήτηση κυψέλης (cell acquisition), η μεταγωγή κ.α. και μεταφέρουν σημαντικές παραμέτρους της μετάδοσης όπως η φυσική ταυτότητα της κυψέλης, το χρονοδιάγραμμα της δομής του πλαισίου FDD/TDD, το είδος του κυκλικού προθέματος.

Στο LTE ορίζονται δύο σήματα συγχρονισμού: το πρωτεύων PSS (Primary Synchronization Signal) και το δευτερεύον SSS σήμα (Secondary Synchronization Signal). Μεταδίδονται δύο φορές μέσα σε ένα πλαίσιο διατεταγμένα στα **υποπλάγια 0 και 5**. Στη δομή FDD το PSS τοποθετείται πάντα στο τελευταίο OFDM σύμβολο της πρώτης και ενδέκατης χρονοθυρίδας του πλαισίου ενώ το SSS στο αμέσως προηγούμενο του PSS. Θεωρώντας **κανονικό κυκλικό πρόθεμα** τα PSS και SSS βρίσκονται στα **OFDM σύμβολα με δείκτες θέσεις 6 και 5** αντίστοιχα στα υποπλάγια 0 και 5.



Σχήμα 3.31: PSS and SSS frame and slot structure

Στο **πεδίο της συχνότητας** και τα δύο σήματα εκτείνονται σε **6 RBs** στο κέντρο του φάσματος και δεσμεύουν **62 κεντρικούς υποφορείς** ομοιόμορφα κατανεμημένους γύρω από την dc υποφέρουσα.



Σχήμα 3.32: PSS / SSS resource element mapping

Η κατανομή των PSS και SSS αντιστοιχεί στο ελάχιστο εύρος ζώνης 1.08MHz (6 RBs) στη συχνότητα είναι σταθερή και ανεξάρτητη από τη διαμόρφωση του φάσματος του καναλιού 1.4MHz έως 20MHz. Η επιλογή αυτή εγγυάται ότι η συσκευή είναι σε θέση να λάβει τα δύο σήματα συγχρονισμού χωρίς να απαιτείται επιπρόσθετη πληροφόρηση αναφορικά με το εύρος ζώνης της κατερχόμενη ζεύξης.

Ο λόγος της δέσμευσης μόνο 62 από τις 72 υποφέρουσες που περιέχονται σε 6 RBs οφείλεται στο ότι η συσκευή για την ανίχνευση τους χρησιμοποιεί FFT μικρότερου μεγέθους (64 έναντι 128 εφόσον η είσοδος πρέπει να είναι δύναμη του 2) και χαμηλότερο ρυθμό δειγματοληψίας. Οι υπόλοιποι 10 υποφορείς παραμένουν αχρησιμοποίητοι.

Συνεπώς το πλήθος των REs που απαιτούνται για την απεικόνιση των PSS και SSS συμβόλων είναι:

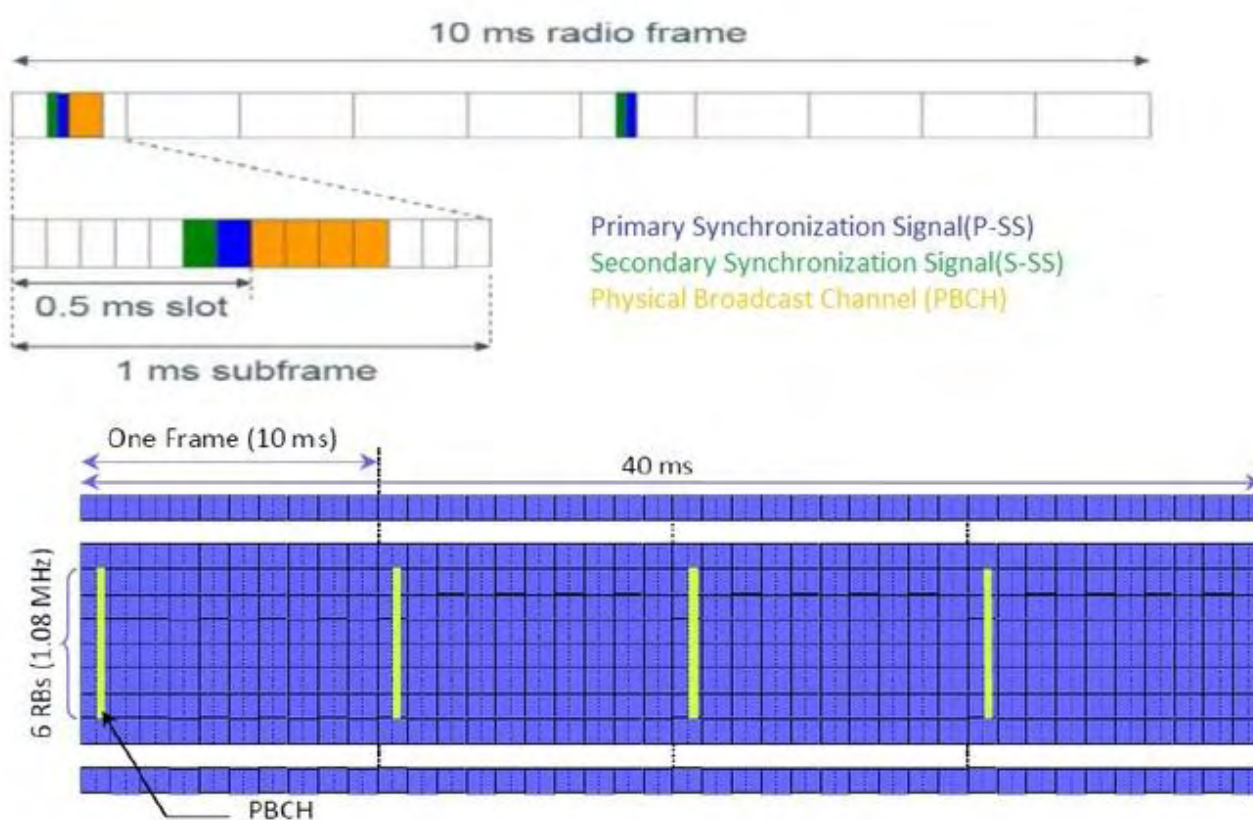
$$N_{PSS} = N_{SSS} = 62 \quad \text{για κάθε υποπλαίσιο 0 και 5}$$

$$N_{PSS_frame} = N_{SSS_frame} = 124 \quad \text{για το LTE πλαίσιο}$$

3.13.3 PBCH resource element mapping

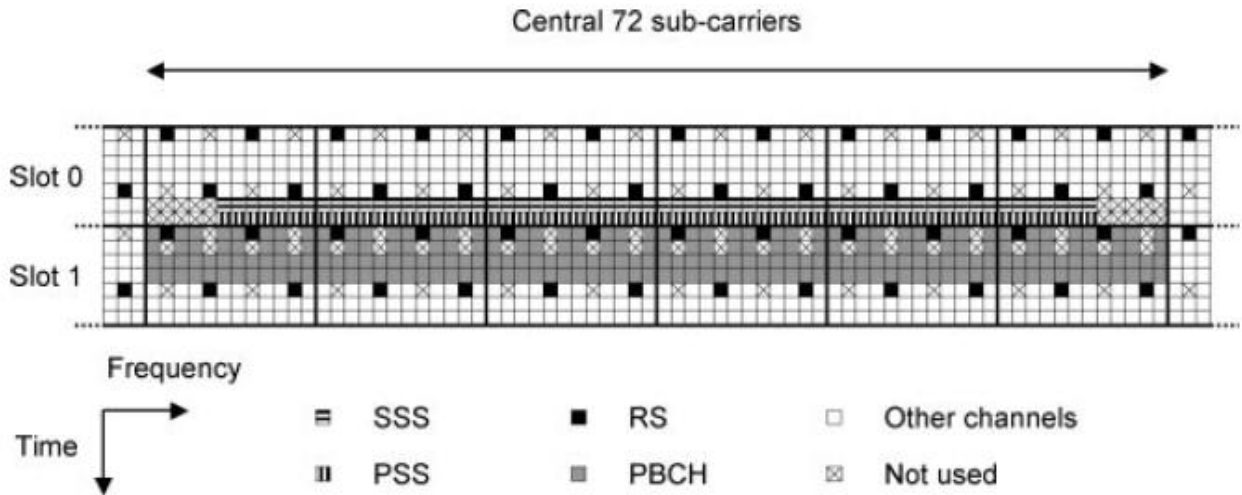
Το κανάλι **PBCH** μεταφέρει την πληροφορία συστήματος **MIB** η οποία υποδηλώνει το πλήθος των κεραιών μετάδοσης, το εύρος ζώνης της κατερχόμενης ζεύξης, τον αριθμό πλαισίου συστήματος (System Frame Number - SFN) και τη διαμόρφωση του καναλιού ελέγχου PHICH (PHICH configuration).

Η πληροφορία **MIB** υποδιαιρείται σε τέσσερα ισομεγέθη πεδία. Τα πεδία κατανέμονται σε **τέσσερα διαδοχικά πλαίσια** και τοποθετούνται στο πρώτο υποπλάισιο του κάθε πλαισίου εξασφαλίζοντας έτσι **περίοδο μετάδοσης της MIB ίση με 40ms**. Με κανονικό κυκλικό πρόθεμα κάθε πεδίο της MIB καταλαμβάνει τα **4 πρώτα OFDM** σύμβολα στις θέσεις {7, 8, 9, 10} της δεύτερης χρονοθυρίδας (slot index = 1) του υποπλαισίου.



Σχήμα 3.33: Δομή του PBCH

Στο πεδίο της συχνότητας το PBCH δεσμεύει σταθερά **72 κεντρικούς υποφορείς** (ελάχιστο εύρος ζώνης των 6 RBs) κατανεμημένους γύρω από την dc υποφέρουσα έτσι ώστε η λήψη της MIB να καθίσταται ανεξάρτητη από το εύρος ζώνης του καναλιού.



Σχήμα 3.34: PBCH resource element mapping

Από το πλήθος των RBs που δεσμεύονται για την απεικόνιση της MIB εξαιρούνται τα REs του OFDM συμβόλου στη θέση 7 τα οποία αντιστοιχούν στα CSRs σύμβολα. Επομένως ο αριθμός των PBCH συμβόλων ολόκληρου του πλαισίου προκύπτει ως εξής:

$$N_{PBCH_frame} = N_{RB}^{min,DL} * N_{sc}^{RB} * N_{symb}^{PBCH} - N_{CSR}^{OFDM_7} \quad (3.28)$$

Όπου:

$N_{RB}^{min,DL}$: το ελάχιστο εύρος ζώνης των 6 RBs

N_{sc}^{RB} : 12 subcarriers ανά RB

N_{symb}^{PBCH} : 4 OFDM σύμβολα για την αναπαράσταση του PBCH στο χρόνο

$N_{CSR}^{OFDM_7}$: 12 REs του OFDM συμβόλου στη θέση 7 του υποπλαισίου για την αναπαράσταση των CSRs συμβόλων

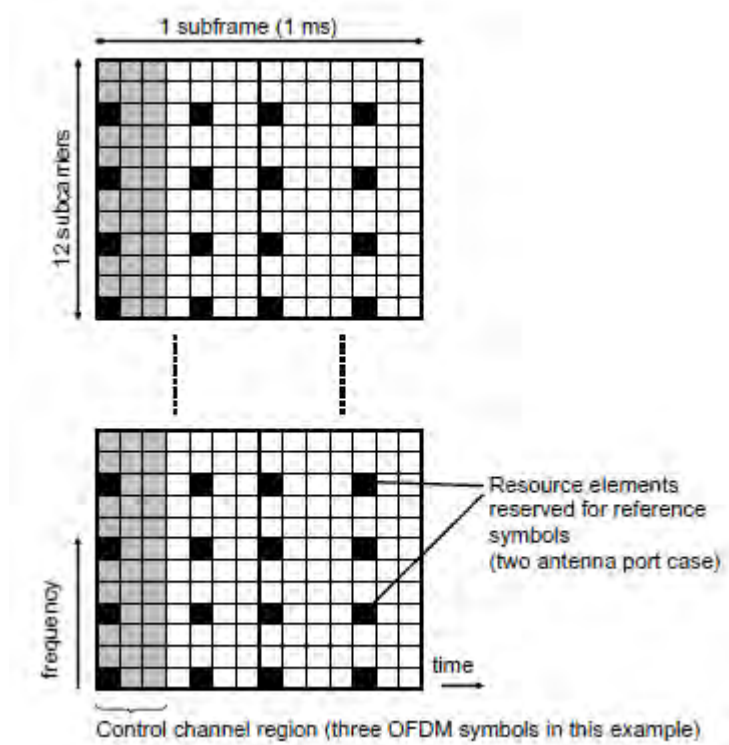
Με την αντικατάσταση των παραπάνω τιμών στον τύπο 3.28 υπολογίζουμε ότι:

$$N_{PBCH_frame} = 276$$

3.13.4 Control region

Κάθε υποπλαίσιο χωρίζεται στην περιοχή ελέγχου (control region) και την περιοχή των δεδομένων (user data region). Η περιοχή ελέγχου περιέχει τις πληροφορίες **DCI**, **CFI** και **HI** των φυσικών καναλιών **PDCCH**, **PCFICH** και **PHICH** αντίστοιχα. Οι πληροφορίες ελέγχου είναι απαραίτητες για την επιτυχημένη λήψη, αποδιαμόρφωση και αποκωδικοποίηση των δεδομένων του PDSCH και του PBCH.

Η περιοχή ελέγχου προηγείται πάντα της περιοχής των δεδομένων σε κάθε υποπλαίσιο. Δεσμεύει τα πρώτα N OFDM σύμβολα όπου το $N = \{1, 2, 3, 4\}$ εκτός από τα REs του πρώτου OFDM συμβόλου που αντιστοιχούν στα σήματα αναφοράς CSRs. Το μήκος της περιοχής ελέγχου N μπορεί να μεταβάλλεται μεταξύ των υποπλαισίων ενώ στο πεδίο της συχνότητας εκτείνεται σε όλο το διαθέσιμο φάσμα του καναλιού.



Σχήμα 3.35: Resource grid control region

Το πλήθος των REs που αναπαριστούν το περιεχόμενο των καναλιών PDCCH, PCFICH και PHICH εξαρτάται από το μέγεθος N της περιοχής ελέγχου και μεταβάλλεται σε κάθε υποπλαίσιο ως εξής:

$$N_{\text{control_region_RE}} = N_{\text{DCI}} + N_{\text{CFI}} + N_{\text{HI}} = N_{\text{RB}}^{DL} * [10 + 12 * (N - 1)] \quad (3.29)$$

3.13.4.1 PCFICH resource element mapping

Το κανάλι PCFICH μεταφέρει τον δείκτη **CFI** (Control Format Indicator) ο οποίος υποδεικνύει τον ακριβή αριθμό των OFDM συμβόλων $N = \{1, 2, 3, 4\}$ που καταλαμβάνει η περιοχή ελέγχου σε κάθε υποπλαίσιο. Το LTE ορίζει τρεις τιμές για το **CFI** = {1, 2, 3}.

Το πλήθος των OFDM συμβόλων της περιοχής ελέγχου προκύπτει από τον δείκτη CFI ως εξής:

- Για **BW = 1.4MHz** : $N = CFI + 1$ (3.30)

- Για **BW > 1.4MHz** : $N = CFI$ (3.31)

Η πληροφορία CFI αναπαρίσταται σε **16 REs** του πρώτου OFDM συμβόλου σε κάθε υποπλαίσιο. Τα 16 REs οργανώνονται σε ομάδες των τεσσάρων γνωστές ως REGs (Resource Element Groups). Η έννοια του REG χρησιμοποιείται επίσης για τα κανάλια PDCCH και PHICH. Στο πεδίο της συχνότητας τα REs κάθε ομάδας κατανέμονται σε διαδοχικούς υποφορείς υπό την προϋπόθεση ότι αποκλείονται τα REs των CSRs συμβόλων. Η ακριβής τοποθέτηση του PCFICH εξαρτάται από την φυσική ταυτότητα της κυψέλης N_{ID}^{cell} και το εύρος ζώνης του καναλιού N_{RB}^{DL} και υπολογίζεται από τους παρακάτω τύπους.

$$\tilde{\kappa} = (N_{sc}^{RB}/2) * (N_{ID}^{cell} \bmod 2N_{RB}^{DL}) \quad (3.32)$$

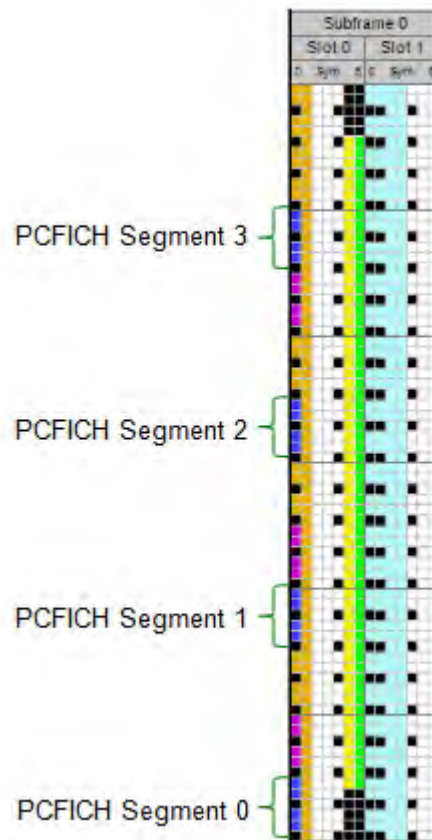
$$\kappa = \tilde{\kappa} \quad (3.33)$$

$$\kappa = \tilde{\kappa} + \lfloor N_{RB}^{DL}/2 \rfloor * N_{sc}^{RB}/2 \quad (3.34)$$

$$\kappa = \tilde{\kappa} + \lfloor 2 N_{RB}^{DL}/2 \rfloor * N_{sc}^{RB}/2 \quad (3.35)$$

$$\kappa = \tilde{\kappa} + \lfloor 3 N_{RB}^{DL}/2 \rfloor * N_{sc}^{RB}/2 \quad (3.36)$$

Το σχήμα 3.36 απεικονίζει την αναπαράσταση του PCFICH στο resource grid για $N_{ID}^{cell} = 20$ και $N_{RB}^{DL} = 6$.



Σχήμα 3.36: PCFICH resource element mapping

Η συσκευή στην αρχή του κάθε υποπλαισίου αφού εντοπίσει και αποκωδικοποιήσει την πληροφορία CFI προσδιορίζει το εύρος της περιοχής ελέγχου και έπειτα συνεχίζει με την λήψη και αποκωδικοποίηση των PHICH και PDCCH.

3.13.4.2 PHICH resource element mapping

Το κανάλι PHICH μεταφέρει την πληροφορία του δείκτη **HI** (HARQ Indicator) ο οποίος υποδηλώνει αν ο σταθμός βάσης έλαβε σωστά την uplink μετάδοση της συσκευής στο κανάλι PUSCH. Η τιμή του HI είναι 0 στην περίπτωση θετικής απάντησης (ACK) και 1 για αρνητική (NACK).

Η αναπαράσταση της πληροφορίας του PHICH στο resource grid καθορίζεται από τους εξής παράγοντες:

- **PHICH duration** (normal ή extended)
- Τη διαμόρφωση φάσματος N_{RB}^{DL}
- Την ειδική παράμετρο N_g
- Το **κυκλικό πρόθεμα** (normal ή extended)

Οι τρεις πρώτες παράμετροι εμπεριέχονται στην πληροφορία MIB ενώ το είδος του κυκλικού προθέματος υποδηλώνεται στο σήμα συγχρονισμού SSS.

Η απεικόνιση του PHICH (ACK ή NACK) μίας συσκευής απαιτεί **12 REs** τα οποία οργανώνονται σε ομάδες των τεσσάρων και δημιουργούν τρία REGs χωρίς να περιλαμβάνονται REGs ή REs που ανήκουν στο PCFICH και στα CSRs αντίστοιχα. Τα PHICH REGs κατανέμονται ομοιόμορφα σε ολόκληρο το φάσμα του καναλιού και συγκροτούν ένα **PHICH group**. Ένα PHICH group δεν δεσμεύεται αποκλειστικά από μία συσκευή αλλά διαμοιράζεται σε πολλαπλές συσκευές. Ο μέγιστος αριθμός των PHICHs που πολυπλέκονται στο ίδιο PHICH group είναι 8 για την περίπτωση κανονικού κυκλικού προθέματος και 4 για την περίπτωση του εκτεταμένου με τα PHICHs να διακρίνονται μεταξύ τους μέσω ορθογώνιων ακολουθιών (**orthogonal Walsh sequences**).

Το πλήθος των PHICH groups καθορίζεται από τη διαμόρφωση του φάσματος N_{RB}^{DL} και την ειδική παράμετρο N_g . Στον FDD τρόπο είναι σταθερό και προκύπτει από τον τύπο (3.37).

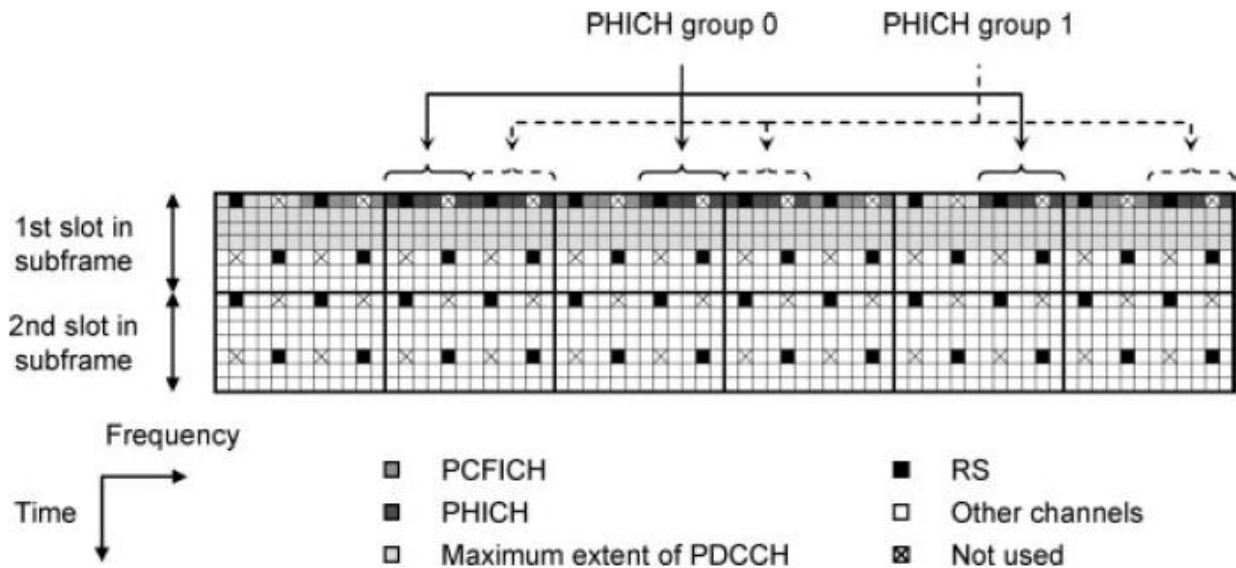
$$N_{group}^{PHICH} = \begin{cases} \lceil N_g(N_{RB}^{DL}/8) \rceil & \text{normal CP} \\ 2 * \lceil N_g(N_{RB}^{DL}/8) \rceil & \text{extended CP} \end{cases} \quad (3.37)$$

Όπου $N_g = \{\frac{1}{6}, \frac{1}{2}, 1, 2\}$

Για να προσδιορίσουμε ένα συγκεκριμένο PHICH χρειαζόμαστε τον αριθμό του PHICH group και τον δείκτη ορθογώνιας ακολουθίας (orthogonal sequence index).

Τα REGs ενός PHICH group τοποθετούνται στο πρώτο OFDM σύμβολο της περιοχής ελέγχου κάθε υποπλαισίου όταν χρησιμοποιείται η κανονική διάρκεια PHICH (normal PHICH duration). Σε περίπτωση χρήσης της εκτεταμένης διάρκειας PHICH (extended PHICH duration) καταλαμβάνουν 2 ή 3 OFDM σύμβολα.

Το σχήμα 3.37 δείχνει την απεικόνιση της πληροφορίας του PHICH σε 2 PHICH groups για το κανάλι 1.4MHz, κανονική διάρκεια PHICH και χρήση κανονικού κυκλικού προθέματος.



Σχήμα 3.37: PHICH resource element mapping

3.13.4.3 Physical Downlink Control Channel (PDCCH)

Το κανάλι PDCCH μεταφέρει πληροφορίες ελέγχου που σχετίζονται με τον προγραμματισμό της ανάθεσης των πόρων στην κατερχόμενη και ανερχόμενη ζεύξη σε μία συσκευή ή σε ένα σύνολο αυτών. Η PDCCH πληροφορία πρέπει να διαβαστεί και να αποκωδικοποιηθεί πρώτη ώστε η συσκευή να είναι σε θέση να λάβει δεδομένα στο PDSCH ή να στείλει δεδομένα στο σταθμό βάσης.

Οι πληροφορίες του PDCCH βρίσκονται στην περιοχή ελέγχου του κάθε υποπλαισίου και καταλαμβάνουν 1, 2, 3 ή 4 OFDM σύμβολα ανάλογα με την τιμή του δείκτη CFI του καναλιού PCFICH.

3.13.4.3.1 Downlink Control Information (DCI)

Η πληροφορία ελέγχου που μεταφέρει το PDCCH ονομάζεται **DCI**. Το DCI περιέχει πληροφορίες:

- προγραμματισμού των πόρων στην κατερχόμενη ζεύξη (**downlink scheduling commands**)
- προγραμματισμού των χορηγήσεων και αναθέσεων πόρων στην ανερχόμενη ζεύξη (**uplink scheduling grants**)
- **Uplink power control commands**
- μηνύματα σηματοδότησης όπως πληροφορίες συστήματος (**SI**)
- ειδοποιήσεις **paging**

Η πληροφορία DCI είναι απαραίτητη για την σωστή λήψη, αποδιαμόρφωση και αποκωδικοποίηση των δεδομένων του χρήστη. Συνεπώς πρέπει να ληφθεί και να

διαβαστεί πριν το PDSCH. Χωρίς το DCI είναι αδύνατη η ερμηνεία του PDSCH και η επικοινωνία ανάμεσα στο σταθμό βάσης και τη συσκευή.

Ο σταθμός βάσης μεταδίδει αρκετά DCIs ή αλλιώς PDCCHs σε κάθε υποπλαίσιο. Αυτό σημαίνει ότι το περιεχόμενο του DCI μηνύματος πρέπει να είναι αρκετά μικρό και να περιλαμβάνει μόνο τις απαραίτητες πληροφορίες που πρέπει να γνωρίζει η συσκευή. Για παράδειγμα σε μία συσκευή που δεν υποστηρίζει MIMO λειτουργία δεν υπάρχει λόγος μετάδοσης των αντίστοιχων παραμέτρων. Για να αποφευχθούν καταστάσεις υπερβολικής σηματοδότησης που θα υποβάθμιζαν την απόδοση του συστήματος το LTE ορίζει διαφορετικά **DCI format**. Κάθε format περιέχει σημαντικές παραμέτρους όπως ο τύπος καταχώρησης (resource allocation type), το resource block assignment, ο τρόπος μετάδοσης, ο τύπος της διαμόρφωσης, ο ρυθμός κωδικοποίησης, το μέγεθος του transport block payload κ.α.. Ο πίνακας 3.15 παρουσιάζει όλα τα DCI format που υποστηρίζονται στο LTE. Κάθε format έχει συγκεκριμένη χρήση και πληροφορίες.

DCI format	Release	Information	Use case	Resource allocation	Transmission mode
0	R8	UL scheduling grants	1 antenna	-	-
1	R8	DL scheduling commands	1 antenna, open loop diversity, beamforming	Type 0 & 1	1, 2, 7
1A	R8	Compact version of format 1 DL scheduling commands	1 antenna, open loop diversity	Type 2	Any
1B	R8	Very compact DL scheduling commands	Closed loop diversity	Type 2	6
1C	R8	Very compact DL scheduling commands	System information, paging, random access responses	Type 2	Any
1D	R8	Compact DL scheduling commands	Multiple user MIMO	Type 2	5
2	R8	DL scheduling commands	Closed loop MIMO	Type 0 & 1	4
2A	R8	DL scheduling commands	Open loop MIMO	Type 0 & 1	3
2B	R9	DL scheduling commands	Dual layer beamforming	Type 0 & 1	8
2C	R10	DL scheduling commands	8 layer MIMO	Type 0 & 1	9
3	R8	UL power control	2 bit power adjustments	-	-
3A	R8	UL power control	1 bit power adjustments	-	-
4	R10	UL scheduling grants	Closed loop MIMO	-	-

Πίνακας 3.15: LTE DCI formats

Στη συνέχεια παραθέτουμε το περιεχόμενο του DCI format 1 και την περιγραφή κάθε πεδίου του.

Field	Number of bits on PDCCH	Description
Resource allocation header	1	Indicates the selected resource allocation type 0 or type 1
Resource block assignment	Depends on resource allocation type	Indicates resource blocks on PDSCH to be assigned to the terminal
Modulation & Coding Scheme (MCS)	5	Indicates the type of modulation and coding used, together with the transport block size and the number of resource blocks allocated
HARQ process number	3 (FDD) 4(TDD)	Indicates the HARQ ID used in asynchronous stop and wait protocol
New data indicator	1	Indicates whether the current packet is a new transmission or a retransmission
Redundancy version	2	Indicates the incremental redundancy state of the HARQ process
PUCCH TPC command	2	Indicates the transmit power control command for adaptation of transmit power on PUCCH
Downlink assignment index	2	(Only for TDD mode) Indicates the number of downlink subframes used for uplink ACK/NACK bundling

Πίνακας 3.16: Περιεχόμενο του DCI format 1

Το μέγεθος της DCI πληροφορίας εξαρτάται από το format που θα χρησιμοποιηθεί και τη διαμόρφωση του φάσματος. Στον πίνακα 3.17 παρουσιάζεται το μέγεθος του DCI format payload όπως αυτό προκύπτει μετά από την προσάρτηση του CRC.

	Bandwidth (PRBs)					
	6	15	25	50	75	100
Format 0	35	37	39	41	42	43
Format 1	35	38	43	47	49	55
Format 1A	36	38	40	42	43	44
Format 1B/1D (2 transmit antenna ports)	38	40	42	44	45	46
Format 1C	24	26	28	29	30	31
Format 2 (2 transmit antenna ports)	47	50	55	59	61	67
Format 2A (2 transmit antenna ports)	44	47	52	56	58	64
Format 2B (2 or 4 transmit antenna ports)	44	47	52	56	58	64
Format 2C	46	49	54	58	60	66
Format 4 (2 UE transmit antennas)	46	47	50	52	53	54
Format 1B/1D (4 transmit antenna ports)	40	42	44	46	47	48
Format 2 (4 transmit antenna ports)	50	53	58	62	64	70
Format 2A (4 transmit antenna ports)	46	49	54	58	60	66
Format 4 (4 UE transmit antennas)	49	50	53	55	56	57

Πίνακας 3.17: DCI format payload size

3.13.4.3.2 Resource allocation

Η μονάδα του RB χρησιμοποιείται για τον προγραμματισμό των πόρων στο πεδίο της συχνότητας. Μία από τις κυριότερες αρμοδιότητες του PDCCH είναι η ενημέρωση της συσκευής αναφορικά με τον τρόπο που χρησιμοποιεί ο σταθμός βάσης για την κατανομή των RBs που μεταφέρουν τα δεδομένα του PDSCH.

Ο πιο εύκολος τρόπος ανάθεσης προκύπτει από τη χρήση ενός διανύσματος από bits (**bitmap**) όπου κάθε bit αντιστοιχεί σε ένα συγκεκριμένο RB. Η μέθοδος αυτή δουλεύει αποτελεσματικά στην περίπτωση μικρού εύρους καναλιού με $N_{RB}^{DL} \leq 10$. Για μεγάλο εύρος ζώνης καθίσταται μη πρακτική αφού απαιτείται αρκετά μεγάλο μήκος του bitmap με αποτέλεσμα το μέγεθος του PDCCH να υπερβαίνει σημαντικά το μέγεθος του πακέτου δεδομένων.

Το LTE υποστηρίζει τρεις τύπους κατανομής πόρων: τον τύπο 0, 1 και 2.

Resource allocation type 0

Στην κατανομή τύπου 0 τα Physical Resource Blocks - PRBs του εύρους ζώνης του καναλιού οργανώνονται σε ομάδες οι οποίες ονομάζονται **RBGs** (Resource Block Groups). Ένα RBG αποτελείται από διαδοχικά RBs και το μέγεθός του (P) εξαρτάται από τη διαμόρφωση του φάσματος όπως ορίζεται από τον πίνακα 3.18.

System Bandwidth N_{RB}^{DL}	RBG Size (P)
≤ 10	1
11 – 26	2
27 - 63	3
64 - 110	4

Πίνακας 3.18: Resource allocation type 0 vs Downlink system bandwidth

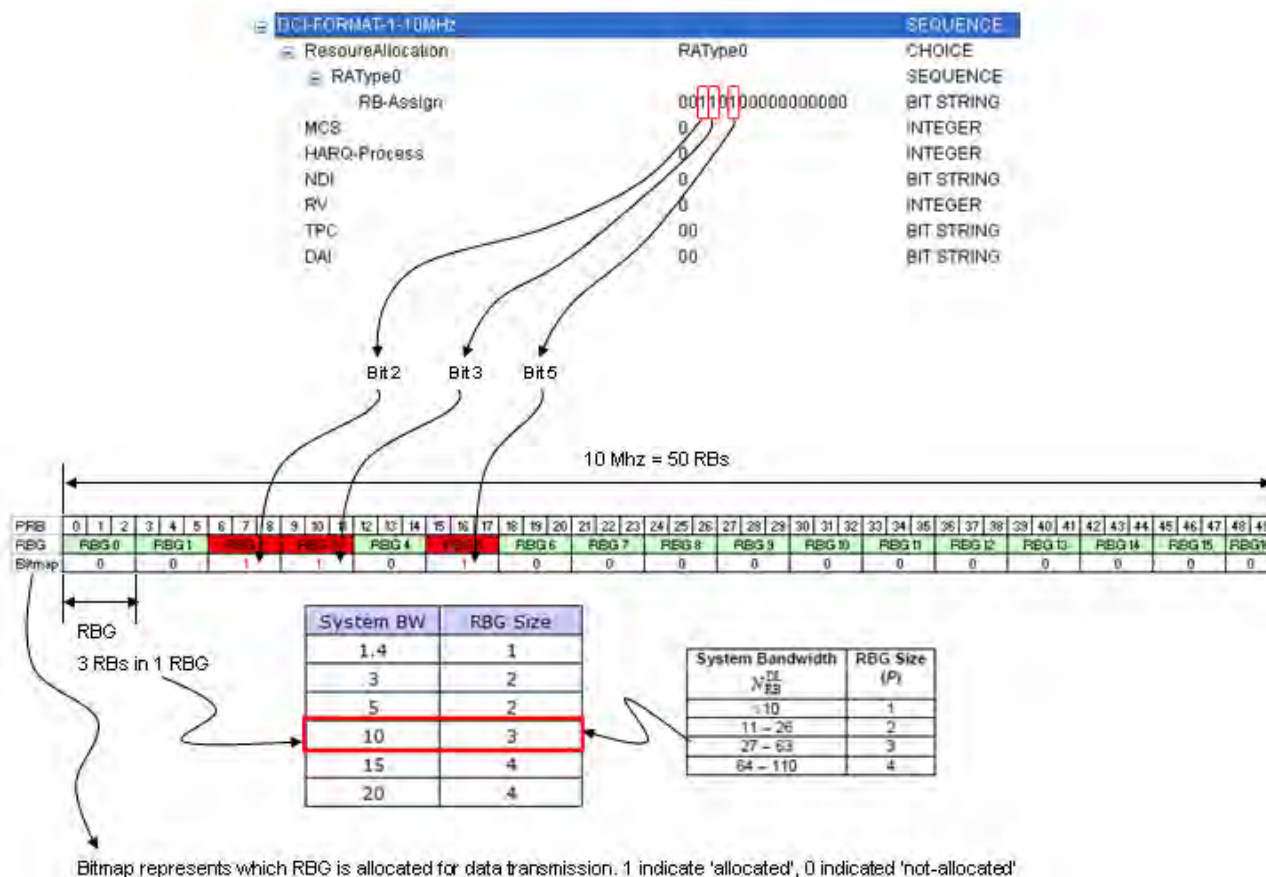
Ο συνολικός αριθμός των RBGs για εύρος ζώνης N_{RB}^{DL} υπολογίζεται από τον τύπο 3.38.

$$N_{RBG} = \left\lceil \frac{N_{RB}^{DL}}{P} \right\rceil \quad (3.38)$$

Τα PRBs αριθμούνται από 0 έως $N_{RBG} - 1$ με αύξουσα σειρά στη συχνότητα.

Η κατανομή τύπου 0 χρησιμοποιεί ένα διάνυσμα από bits (**bitmap**) το οποίο υποδεικνύει ποια RBs έχουν καταχωρηθεί στη συσκευή. Το μήκος του bitmap είναι ίσο με N_{RBG} και κάθε bit του ξεκινώντας από το MSB προς το LSB αντιστοιχεί σε ένα RBG. Στον τύπο 0 η ανάθεση πραγματοποιείται σε επίπεδο RBG. Ένα RBG έχει ανατεθεί στη συσκευή αν η τιμή του bit που το καταδεικνύει είναι 1.

Το σχήμα 3.38 απεικονίζει την μέθοδο resource allocation type 0 για κανάλι με εύρος 10MHz.



Σχήμα 3.38: Resource allocation type 0

Resource allocation type 1

Στην κατανομή τύπου 1 τα RBs ομαδοποιούνται σε **RBGs**. Στη συνέχεια τα RBGs οργανώνονται σε **RBG subsets**. Το μέγεθος P ενός RBG και ο αριθμός των RBGs που συνθέτουν ένα RBG subset καθορίζονται από το διαθέσιμο φάσμα σύμφωνα με το πίνακα 3.18. Το σύνολο των RBG subsets ισούται με το πλήθος P των RBs σε ένα RBG.

Η πληροφορία της κατανομής τύπου 1 αποτελείται από τρία πεδία.

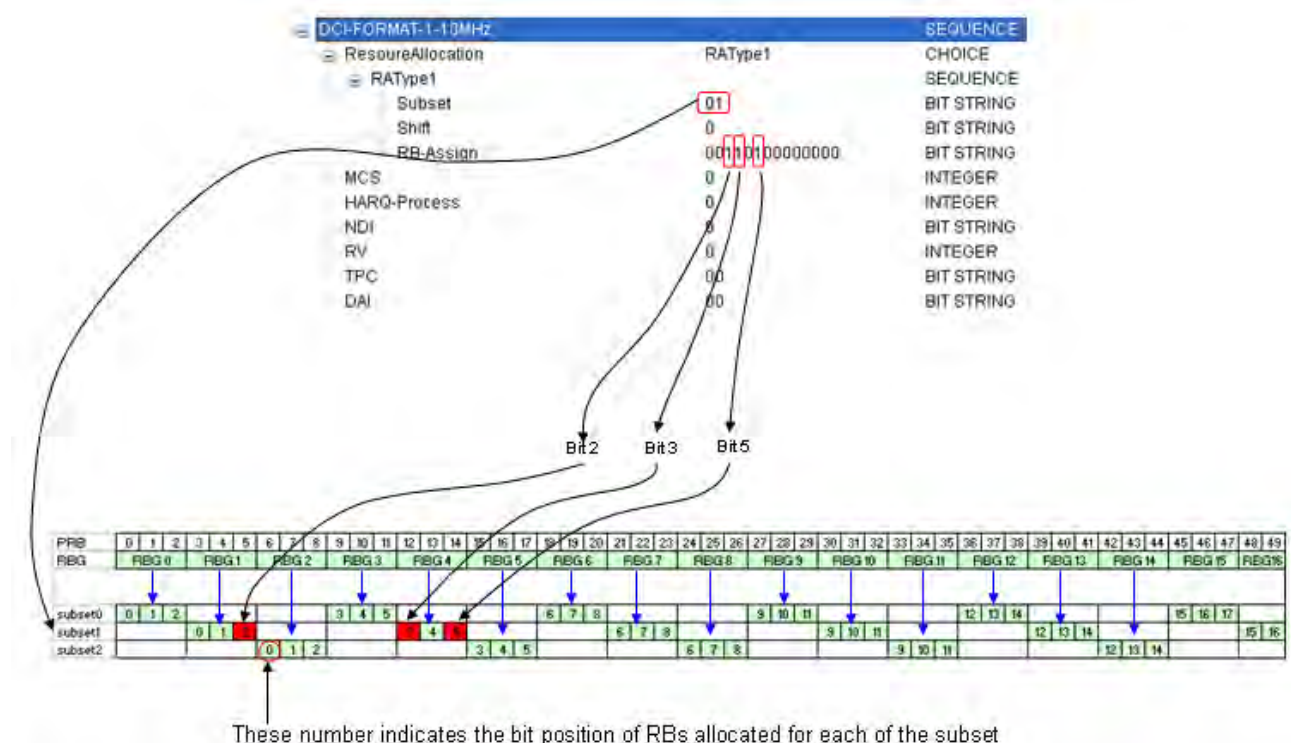
- Το πρώτο πεδίο περιέχει $\lceil \log_2(P) \rceil$ bits και υποδεικνύει ένα συγκεκριμένο RBG subset ανάμεσα σε P RBG subsets.
- Το δεύτερο πεδίο ενός bit ονομάζεται shift και καθορίζει πότε πραγματοποιείται ολίσθηση της κατανομής των PRBs μέσα σε ένα RBG subset. Η ολίσθηση είναι ενεργοποιημένη αν η τιμή του bit είναι 1.
- Το τρίτο πεδίο είναι το bitmap. Το μήκος του υποδηλώνει τον αριθμό των RBs ενός RBG subset, είναι μικρότερο συγκριτικό με του τύπου 0 λόγω της ύπαρξης των δύο επιπρόσθετων πεδίων και δίνεται από τον τύπο

$$N_{RB}^{TYPE1} = \left\lceil \frac{N_{RB}^{DL}}{P} \right\rceil - \lceil \log_2(P) \rceil - 1 \quad (3.39)$$

Το resource allocation type 1 μας παρέχει τη δυνατότητα καταχώρησης μεμονωμένων PRBs μόνο όμως μέσα σε ένα επιλεγμένο RBG subset. Κάθε bit του πεδίου bitmap ξεκινώντας από το MSB μέχρι το LSB υποδεικνύει το αντίστοιχο PRB εντός του RBG subset που καθορίζεται από το πρώτο πεδίο της πληροφορίας κατανομής καθώς κινούμαστε προς τις υψηλότερες υποφέρουσες στη συχνότητα. Το PRB καταχωρείται στη συσκευή αν η τιμή του αντίστοιχου bit είναι 1.

Στην κατανομή τύπου 1 δεν μπορούμε να επιλέξουμε όλα τα RBs για ανάθεση σε μία συσκευή αφού δεν υπάρχει subset που να περιέχει όλα RBGs. Αυτός ο τύπος κατανομής είναι κατάλληλος σε περιβάλλοντα με ισχυρή εξασθένηση συχνοτήτων επειδή τα PRBs που καταχωρούνται στη συσκευή δεν είναι διαδοχικά αλλά εκτείνονται σε όλο το φάσμα του καναλιού.

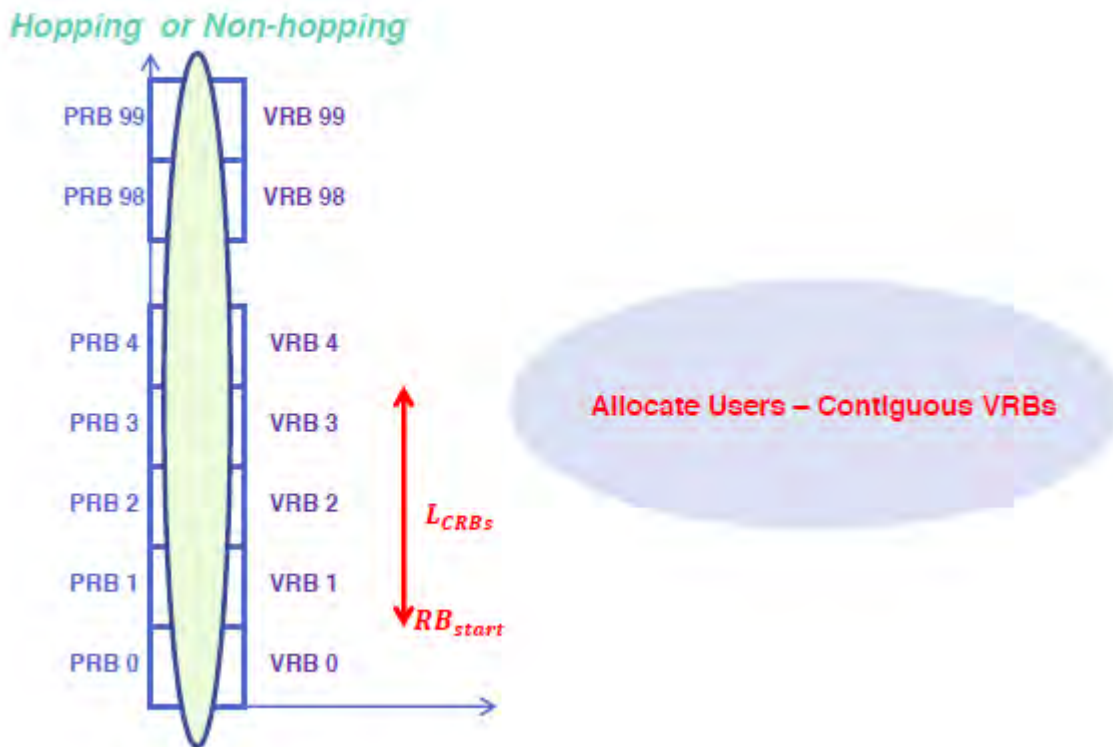
Τα DCI format 1,2 και 2A στην έκδοση 8 υποστηρίζουν κατανομή πόρων 0 και 1 έχοντας το ίδιο περιεχόμενο. Η διάκριση ανάμεσα στους δύο τύπους υποδηλώνεται από το πεδίο resource allocation header ενός bit στο DCI. Η τιμή 0 σημαίνει resource allocation type 0 ενώ 1 resource allocation type 1.



Σχήμα 3.39: Resource allocation type 1

Resource allocation type 2

Στην περίπτωση της κατανομής πόρων τύπου 2 ο σταθμός βάσης εκχωρεί ένα σύνολο συνεχόμενων RBs. Όμως η συνεχής κατανομή αναφέρεται σε Virtual Resource Blocks (VRBs) και όχι σε Physical Resource Blocks (PRBs) όπως γίνεται στις κατανομές τύπου 0 και 1. Το γεγονός αυτό συνεπάγεται την ανάγκη μετατροπής της εικονικής κατανομής (virtual allocation) σε φυσική κατανομή (physical allocation).



Σχήμα 3.40: Virtual Resource Blocks vs Physical Resource Blocks

Στο LTE ορίζονται δύο τύποι εικονικής κατανομής: localized virtual allocation και distributed virtual allocation. Ο τύπος της εικονικής ανάθεσης που χρησιμοποιείται υποδηλώνεται από το αντίστοιχο πεδίο ενός bit της πληροφορίας κατανομής του DCI format και καθορίζει τον κατάλληλο μηχανισμό μετατροπής σε physical allocation. Τιμή 0 σημαίνει localized και 1 distributed.

Στην περίπτωση του **localized** τύπου και οι δύο κατανομές virtual και physical διανέμουν τα RBs με συνεχή τρόπο. Στον localized τύπο υπάρχει αντιστοιχία ένα προς ένα ανάμεσα στα VRBs και τα PRBs και ισχύει ότι $N_{VRB}^{DL} = N_{PRB}^{DL}$ και $n_{VRB}^{DL} = n_{PRB}^{DL}$. Οι κατανομές 0 και 1 υποστηρίζουν μόνο localized allocation.

Στην περίπτωση του **distributed** τύπου τα VRBs κατανέμονται συνεχόμενα ενώ τα PRBs με μη συνεχή τρόπο σε ευρύτερες περιοχές συχνοτήτων του φάσματος. Οι

τιμές των παραμέτρων N_{gap} και N_{VRB}^{DL} υπολογίζονται σύμφωνα με τον πίνακα 3.9 και τις σχέσεις της ενότητας 3.9.3.2.2..

Η πληροφορία κατανομής στο resource allocation type 2 εκτός από το πεδίο επιλογής localized / distributed περιλαμβάνει επιπλέον άλλα δύο πεδία. Το ένα πεδίο ονομάζεται **RIV** (Resource Indicator Value) και αντιστοιχεί στο αρχικό RB της κατανομής (RB_{start}) ενώ το άλλο πεδίο υποδηλώνει το μήκος L_{CRBS} των εικονικά συνεχόμενων κατανεμημένων RBs. Η παράμετρος RIV υπολογίζεται ως εξής

Αν $(L_{CRBS} - 1) \leq \lfloor N_{RB}^{DL} / 2 \rfloor$ τότε

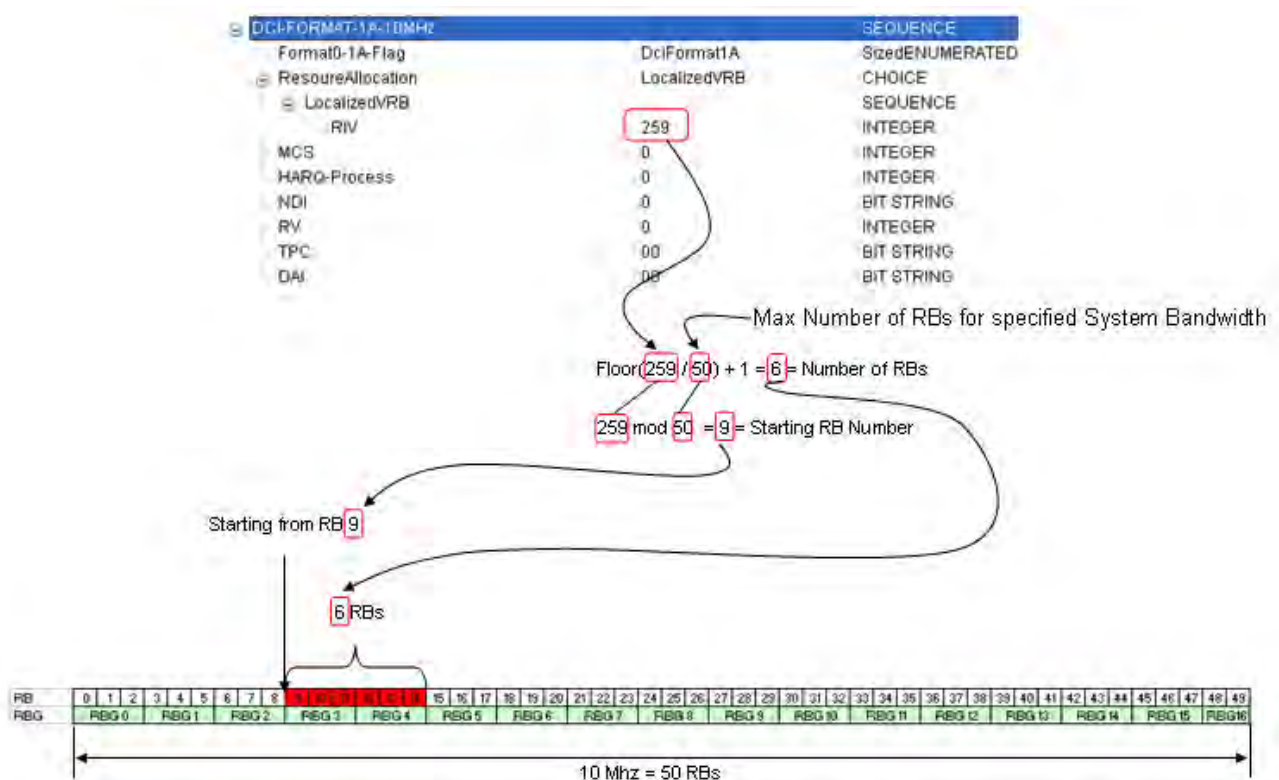
$$RIV = N_{RB}^{DL}(L_{CRBS} - 1) + RB_{start} \quad (3.40)$$

αλλιώς

$$RIV = N_{RB}^{DL}(N_{RB}^{DL} - L_{CRBS} + 1) + (N_{RB}^{DL} - 1 - RB_{start}) \quad (3.41)$$

όπου $1 \leq L_{CRBS} \leq N_{VRB}^{DL} - RB_{start}$

Το σχήμα 3.41 απεικονίζει την κατανομή τύπου 2 εύρος ζώνης 10MHz και χρήση localized VRBs.



Σχήμα 3.41: Resource allocation type 2

Η κατανομή τύπου 2 υποστηρίζεται από τα DCI format 1A, 1B, 1C και 1D.

Ο πίνακας 3.19 παραθέτει συγκεντρωτικά όλες τις μεθόδους κατανομής των πόρων που εφαρμόζονται από το LTE.

Method	UL/DL	Description	Number of bits required (see text for definitions)
Direct bitmap	DL	The bitmap comprises 1 bit per RB. This method is the only one applicable when the bandwidth is less than 10 resource blocks.	N_{RB}^{DL}
Bitmap: 'Type 0'	DL	The bitmap addresses Resource Block Groups (RBGs), where the group size (2, 3 or 4) depends on the system bandwidth.	$\lceil N_{RB}^{DL} / P \rceil$
Bitmap: 'Type 1'	DL	The bitmap addresses individual RBs in a subset of RBGs. The number of subsets (2, 3, or 4) depends on the system bandwidth. The number of bits is arranged to be the same as for Type 0, so the same DCI format can carry either type of allocation.	$\lceil N_{RB}^{DL} / P \rceil$
Contiguous allocations: 'Type 2'	DL or UL	Any possible arrangement of contiguous RB allocations can be signalled in terms of a starting position and number of RBs.	$\lceil \log_2(N_{RB}^{DL}(N_{RB}^{DL} + 1)) \rceil$ or $\lceil \log_2(N_{RB}^{UL}(N_{RB}^{UL} + 1)) \rceil$
Distributed allocations	DL	In the downlink, a limited set of resource allocations can be signalled where the RBs are scattered across the frequency domain and shared between two UEs. The number of bits is arranged to be the same as for contiguous allocations Type 2, so the same DCI format can carry either type of allocation.	$\lceil \log_2(N_{RB}^{DL}(N_{RB}^{DL} + 1)) \rceil$

Πίνακας 3.19: Resource Blocks allocation methods in LTE

3.13.4.3.3 PDCCH resource element mapping

Το PDCCH για τη μεταφορά του χρησιμοποιεί ένα σύνολο από διαδοχικά Control Channel Elements (CCEs) τα οποία κατανέμονται στα πρώτα OFDM σύμβολα του κάθε υποπλαισίου και εκτείνονται σε όλο το διαθέσιμο εύρος ζώνης του καναλιού. 1 CCE αποτελείται από εννέα REGs με το κάθε REG να περιέχει τέσσερα REs. Ο αριθμός των CCEs της περιοχής ελέγχου που είναι διαθέσιμα για τη μεταφορά μηνυμάτων PDCCH καθορίζεται από τον δείκτη CFI του PCFICH και τη διαμόρφωση του φάσματος από 1.4MHz έως 20MHz. Ο αλγόριθμος υπολογισμού των CCEs περιλαμβάνει τα εξής στάδια:

1. Αρχικά υπολογίζουμε το συνολικό αριθμό των REs της περιοχής ελέγχου

$$N_{REs}^{control_region} = N * N_{RB}^{DL} * N_{sc}^{RB} \quad (3.42)$$

Όπου:

N : ο αριθμός των OFDM συμβόλων της περιοχής ελέγχου. Υπολογίζεται από το CFI σύμφωνα με τους τύπους 3.30 και 3.31.

N_{RB}^{DL} : το εύρος ζώνης του καναλιού

N_{sc}^{RB} : ο αριθμός των subcarriers ενός RB

2. Υπολογίζουμε τα REs που αντιστοιχούν στο PDCCH αποκλείοντας τα REs που δεσμεύονται από τα PCFICH, PHICH και τα σήματα αναφοράς CSRs.

$$N_{REs}^{PDCCH} = N_{REs}^{control_region} - N_{REs}^{CSRs} - N_{REs}^{PHICH} - N_{REs}^{PCFICH} \quad (3.43)$$

Οι παράμετροι N_{REs}^{CSRs} , N_{REs}^{PCFICH} και N_{REs}^{PHICH} υπολογίζονται στις ενότητες 3.13.1, 3.13.4.1 και 3.13.4.2 αντίστοιχα.

3. Υπολογίζουμε το πλήθος των CCEs της περιοχής ελέγχου.

$$N_{CCE} = \frac{N_{REs}^{PDCCH}}{36} \quad (4.44)$$

$$1 \text{ CCE} = 9 \text{ (REGs)} * 4 \text{ (REs / REG)} = 36 \text{ REs}$$

4. Τα CCEs της περιοχής ελέγχου τοποθετούνται διαδοχικά και αριθμούνται από 0 έως $N_{CCE} - 1$.

Ο αριθμός των διαδοχικών CCEs που απαιτούνται για τη μεταφορά ενός PDCCH ορίζει το επίπεδο συγκέντρωσης και ονομάζεται **aggregation level**. Το aggregation level λαμβάνει τιμές 1, 2, 4 και 8 και καθορίζεται από το PDCCH format που χρησιμοποιεί ο σταθμός βάσης σύμφωνα με τον πίνακα 3.20. Το LTE υποστηρίζει τέσσερα PDCCH format.

PDCCH format	Number of CCEs	Number of REGs	Number of PDCCH bits
0	1	9	72
1	2	18	144
2	4	36	288
3	8	72	576

Πίνακας 3.20: PDCCH formats

Ο πίνακας 3.20 υποδηλώνει τη σχέση ανάμεσα στο PDCCH format και το aggregation level.

- Για κάθε PDCCH format i ορίζεται aggregation level $L = 2^i$ όπου $i = \{0, 1, 2, 3\}$.

Σύμφωνα με τον παραπάνω κανόνα υπολογίζουμε το aggregation level για κάθε PDCCH format.

- PDCCH format 0 : $L = 2^0 = 1$ CCE (aggregation level 1)
- PDCCH format 1 : $L = 2^1 = 2$ CCE (aggregation level 2)
- PDCCH format 2 : $L = 2^2 = 4$ CCE (aggregation level 4)
- PDCCH format 3 : $L = 2^3 = 8$ CCE (aggregation level 8)

Η τέταρτη στήλη του πίνακα παραθέτει τον αριθμό των PDCCH bits που μεταφέρονται από το σύνολο των CCEs που ορίζει το κάθε PDCCH format. Για τον υπολογισμό τους χρησιμοποιούμε τον τύπο 3.45.

$$N_{bit}^{PDCCH_format_i} = L * N_{RBG}^{CCE} * N_{bit}^{RE} \quad (3.45)$$

Όπου:

$i = \{0, 1, 2, 3\}$

$L = \{1, 2, 4, 8\}$: aggregation level

$N_{RBG}^{CCE} = 9$: ο αριθμός των RBG ενός CCE $N_{bit}^{RE} = 2$ bits : ο αριθμός των bits ενός RE ο οποίος προκύπτει από τον τύπο της διαμόρφωσης. Το LTE χρησιμοποιεί διαμόρφωση QPSK για το PDCCH οπότε κάθε RE περιέχει 2 bits.

$$\text{Για } i = 0 : N_{bit}^{PDCCH_format_0} = 1 * 9 \left(\frac{RBG}{CCE} \right) * 4 \left(\frac{REs}{REG} \right) * 2 \left(\frac{bits}{RE} \right) = 72 \text{ bits}$$

$$\text{Για } i = 1 : N_{bit}^{PDCCH_format_1} = 2 * 9 \left(\frac{RBG}{CCE} \right) * 4 \left(\frac{REs}{REG} \right) * 2 \left(\frac{bits}{RE} \right) = 144 \text{ bits}$$

$$\text{Για } i = 2 : N_{bit}^{PDCCH_format_2} = 4 * 9 \left(\frac{RBG}{CCE} \right) * 4 \left(\frac{REs}{REG} \right) * 2 \left(\frac{bits}{RE} \right) = 288 \text{ bits}$$

$$\text{Για } i = 3 : N_{bit}^{PDCCH_format_0} = 8 * 9 \left(\frac{RBG}{CCE} \right) * 4 \left(\frac{REs}{REG} \right) * 2 \left(\frac{bits}{RE} \right) = 576 \text{ bits}$$

Μελετώντας τα δεδομένα του πίνακα 3.20 διαπιστώνουμε ότι η ίδια πληροφορία DCI με ακριβώς το ίδιο περιεχόμενο (ίδιο μήκος bits) μπορεί να μεταφερθεί με τέσσερα aggregation levels ανάλογα με το PDCCH format που θα επιλέξει ο σταθμός βάσης. Αυτό συνεπάγεται ότι το code rate του PDCCH εξαρτάται από το PDCCH format. Παραδείγματος χάρη αν χρησιμοποιήσουμε PDCCH format 0 η πληροφορία DCI θα μεταφερθεί με aggregation level 1 από μόνο ένα CCE και το μέγεθός της μετά το rate matching θα είναι ίσο με 72 bits. Στην περίπτωση όμως που επιλέξουμε PDCCH format 3 το μήκος της ίδιας DCI πληροφορίας ισούται με 576 bits δηλαδή 8 φορές μεγαλύτερο από ότι στο PDCCH format 0. Αυτό συμβαίνει διότι χρησιμοποιούμε aggregation level 8 για τη μεταφορά του μηνύματος με αποτέλεσμα η πληροφορία να απλωθεί σε 8 CCEs δεσμεύοντας περισσότερα REs και αυξάνοντας έτσι τον αριθμό των PDCCH bits.

Σε ένα υποπλαίσιο μπορούν να μεταφερθούν περισσότερα του ενός PDCCHs με διαφορετικά aggregation levels. Η διάταξή τους μέσα στην περιοχή ελέγχου πρέπει να ικανοποιεί τη συνθήκη:

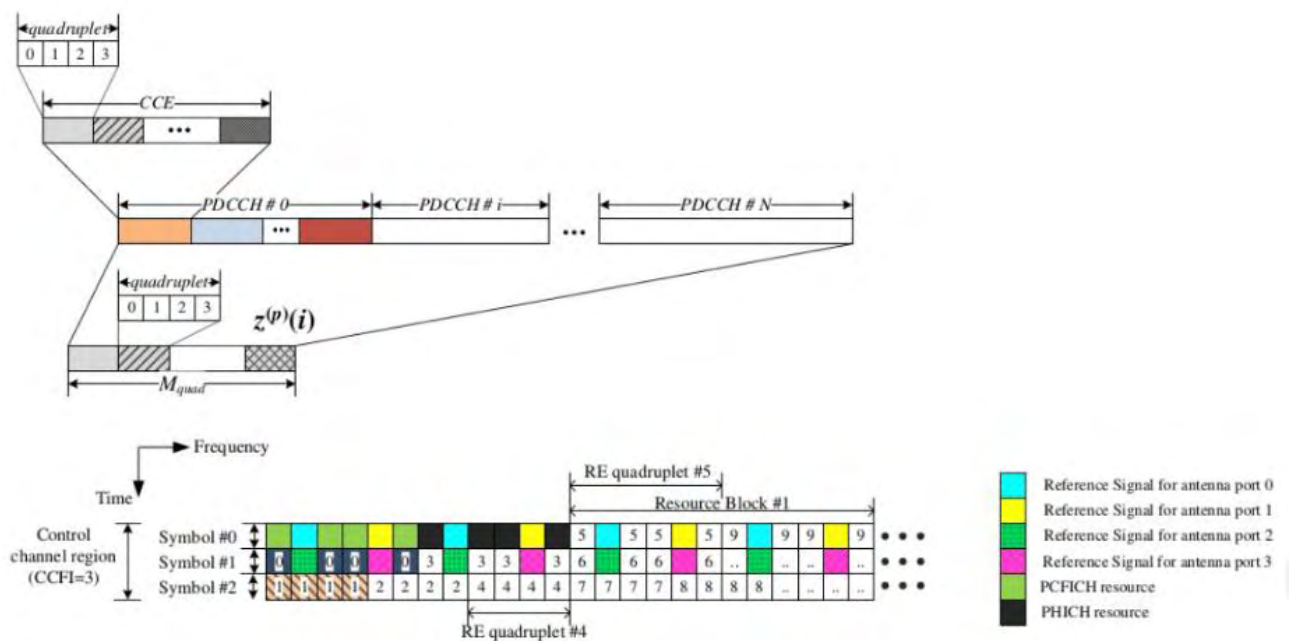
$$(CCE_index) \bmod n = 0 \quad (3.46)$$

Όπου

n : aggregation level

Η εξίσωση 3.46 υποδηλώνει ότι ένα PDCCH που αποτελείται από n διαδοχικά CCEs επιτρέπεται να αρχίζει μόνο από CCE του οποίου ο δείκτης θέσης είναι πολλαπλάσιο του aggregation level n. Για παράδειγμα με aggregation level 4 το αρχικό CCE από τα τέσσερα που χρησιμοποιούνται για τη μεταφορά του PDCCH θα ξεκινάει από τις θέσεις $CCE_index = \{0, 4, 8, 16, \dots\}$.

Το σχήμα 3.42 απεικονίζει την οργάνωση των REs σε CCEs και την αναπαράσταση των PDCCHs στο resource grid.



Σχήμα 3.42: PDCCH resource allocation

3.13.4.3.4 PDCCH transmission and reception

Ο σταθμός βάσης χρησιμοποιεί το PDCCH για την αποστολή της πληροφορίας ελέγχου DCI σε μία συγκεκριμένη συσκευή ή μία ομάδα συσκευών. Το DCI format που επιλέγει εξαρτάται από το transmission mode στο οποίο έχει διαμορφωθεί η συσκευή και τον τύπο του αναγνωστικού RNTI και προκύπτει σύμφωνα με τους πίνακες 7.1-1, 7.1-2, 7.1-3, 7.1-5, 7.1-6 και 7.1-7 που αναγράφονται στο 3GPP TS 36.213 v8.8.0 της έκδοσης 8 του LTE.

Η ταυτότητα **RNTI** (Radio Network Temporary Identifier) υποδηλώνει την ταυτότητα μίας συσκευής ή ενός συνόλου συσκευών στις οποίες απευθύνεται το μήνυμα DCI και ορίζει το είδος των πληροφοριών που προγραμματίζονται για μετάδοση. Οι τύποι του RNTI που υποστηρίζονται στο LTE Rel8 παρουσιάζονται στον πίνακα 3.21.

RNTI type	Release	Information
RA - RNTI	R8	Random access response
Temporary C - RNTI	R8	Random access contention resolution
C - RNTI	R8	One UL or DL transmission
SPS C - RNTI	R8	Several UL or DL transmission
TPC - PUCCH - RNTI	R8	Embedded PUCCH TPC command
TPC - PUSCH - RNTI	R8	Embedded PUSCH TPC command
M - RNTI	R9	MBMS change notification
P - RNTI	R8	Paging message
SI - RNTI	R8	System information message

Πίνακα 3.21: RNTI types in LTE

Το αναγνωστικό RNTI χρησιμοποιείται από το σταθμό βάσης στο transport channel processing στο στάδιο της προσάρτησης του CRC στο DCI. Ο σταθμός βάσης υπολογίζει τον αριθμό των CCEs της περιοχής ελέγχου και τα τοποθετεί διαδοχικά με αρίθμηση από 0 έως $N_{CCE} - 1$. Ένα PDCCH περιέχει ακριβώς ένα DCI το περιεχόμενο του οποίου μεταφέρεται από το σύνολο των CCEs που ορίζει το aggregation level (L). Σε ένα υποπλαίσιο δύναται να υπάρχουν πολλαπλά PDCCHs με διαφορετικά aggregation levels. Για παράδειγμα το PDCCH#0 με $L = 1$ δεσμεύει μόνο 1 CCE ενώ το PDCCH#1 με $L = 4$ καταλαμβάνει 4 CCEs.

Το aggregation level ενός PDCCH καθορίζεται από το μέγεθος του μηνύματος DCI και τις συνθήκες μετάδοσης που επικρατούν στο κανάλι. Ο σταθμός βάσης εφόσον επιλέξει το κατάλληλο DCI format, το μέγεθος του οποίου ορίζεται από τις προδιαγραφές του LTE, υπολογίζει το σύνολο των bits του PDCCH μετά την εφαρμογή του rate matching. Από το πλήθος των PDCCH bits και την τιμή της παραμέτρου CQI ο eNodeB αποφασίζει το aggregation level για το συγκεκριμένο PDCCH. Αν οι συνθήκες μετάδοσης της κατερχόμενης ζεύξης είναι ικανοποιητικές συνήθως επιλέγεται το PDCCH format με τον ελάχιστο απαιτούμενο αριθμό CCEs. Στην περίπτωση όμως δυσμενών συνθηκών ο σταθμός βάσης χρησιμοποιεί PDCCH format με μεγαλύτερο aggregation level προκειμένου να διασφαλιστεί η αξιόπιστη λήψη και αποκωδικοποίηση της πληροφορίας DCI από τη συσκευή. Παραδείγματος χάρη υποθέτουμε ότι ο eNodeB επιθυμεί να αποστείλει ένα PDCCH με μέγεθος 90 bits. Σύμφωνα με τον πίνακα 3.20 το συγκεκριμένο PDCCH απαιτεί τουλάχιστον 2 CCEs για τη μεταφορά του δηλαδή PDCCH format 1 με aggregation level 2. Όμως ο σταθμός βάσης μπορεί να επιλέξει διαφορετικό PDCCH format με υψηλότερο aggregation level 4 ή και 8 ώστε να επιτύχει μεγαλύτερη διασπορά της πληροφορίας σε ολόκληρο το φάσμα του καναλιού αντισταθμίζοντας με αυτόν τον τρόπο τις δυσμενείς συνθήκες μετάδοσης.

Ο σταθμός βάσης κατανέμει τα CCEs σύμφωνα με τη συνθήκη 3.46 η οποία ορίζει ότι κάθε PDCCH πρέπει να ξεκινάει με CCE του οποίου ο δείκτης θέσης είναι πολλαπλάσιο του aggregation level του. Τίθεται επομένως στο σημείο αυτό ένα σημαντικό ερώτημα αναφορικά με τον τρόπο κατανομής των PDCCHs στην περιοχή ελέγχου του κάθε υποπλαισίου. Για να είναι πιο αποτελεσματική και γρήγορη η εξεύρεση του σωστού PDCCH από τη συσκευή ο σταθμός βάσης οργανώνει τα CCEs σε χώρους αναζήτησης (search spaces). Ο χώρος αναζήτησης υποδηλώνει το σύνολο των θέσεων των CCEs για ένα συγκεκριμένο aggregation level όπου μία ή περισσότερες συσκευές μπορούν να εντοπίσουν τα PDCCHs.

Ως **χώρος αναζήτησης** ορίζεται ένα περιορισμένο σύνολο από πιθανές τοποθεσίες ενός PDCCH. Κάθε μία από τις τοποθεσίες ενός χώρου αναζήτησης ονομάζεται υποψήφιος PDCCH (**PDCCH candidate**). Στο LTE υπάρχουν δύο κατηγορίες χώρων αναζήτησης: ο κοινός χώρος (common search space) και ο ειδικός χώρος αναζήτησης (UE-specific search space).

Ο κοινός χώρος αναζήτησης (**common search space**) αποτελείται από CCEs με aggregation levels 4 και 8 τα οποία μεταφέρουν πληροφορίες ελέγχου DCIs που απευθύνονται σε όλες τις συσκευές της κυψέλης. Ο σταθμός βάσης χρησιμοποιεί τον κοινό χώρο για την αποστολή πληροφοριών συστήματος, μηνυμάτων paging, εντολών ελέγχου ισχύος και αποκρίσεων PRACH (PRACH requests) μέσω των αναγνωριστικών SI-RNTI, P-RNTI, TPC-PUCCH / PUSCH - RNTI και RA-RNTI αντίστοιχα. Ο μέγιστος αριθμός CCEs που συγκροτούν έναν κοινό χώρο αναζήτησης είναι 16.

Ο ειδικός χώρος αναζήτησης (**UE-specific search space**) αποτελείται από CCEs τα οποία μεταφέρουν μηνύματα DCI προς μία συγκεκριμένη συσκευή. Ο ειδικός χώρος υποστηρίζει aggregation levels 1, 2, 4 και 8 και η πληροφορία ελέγχου που εμπεριέχεται σε αυτόν μπορεί να αποκωδικοποιηθεί μόνο από μία συσκευή χρησιμοποιώντας τα αναγνωριστικά C-RNTI, SPS C-RNTI ή temporary C-RNTI που της έχουν ανατεθεί.

Ο κοινός χώρος αναζήτησης καταλαμβάνει τα αρχικά CCEs με αρίθμηση από 0 έως 15. Οι δύο χώροι ενδέχεται να επικαλύπτονται για μία συσκευή. Ο πίνακας 3.22 απεικονίζει τις δύο κατηγορίες περιοχών αναζήτησης, το aggregation level που υποστηρίζουν και το πλήθος των PDCCH candidates που πρέπει να εξερευνήσει μία συσκευή για να βρει την πληροφορία DCI.

Type	Search space $S_k^{(L)}$		Number of PDCCH candidates $M^{(L)}$
	Aggregation level L	Size [in CCEs]	
UE-specific	1	6	6
	2	12	6
	4	8	2
	8	16	2
Common	4	16	4
	8	16	2

Πίνακας 3.22: Search spaces and PDCCH candidates

Η λύση των χώρων αναζήτησης προτιμήθηκε έναντι της τυχαίας τοποθέτησης ενός PDCCH οπουδήποτε στην περιοχή ελέγχου καθώς η τελευταία απαιτεί από τη συσκευή τον έλεγχο όλων των πιθανών τοποθεσιών PDCCH για όλα τα PDCCH και DCI format που μπορεί να έχει επιλέξει ο σταθμός βάσης. Μία τέτοια διαδικασία κρίνεται ακατάλληλη για μεγάλο εύρος ζώνης καναλιού όπου ο αριθμός των υποψήφιων τοποθεσιών ενός PDCCH είναι αρκετά μεγάλος με αποτέλεσμα το υπολογιστικό φορτίο να αυξάνει υπερβολικά για μία συσκευή έχοντας αρνητικό αντίκτυπο στην ενεργειακή της κατανάλωση.

Στο σημείο αυτό ο σταθμός βάσης επιλέγει το aggregation level για κάθε PDCCH, χρησιμοποιεί το κατάλληλο τύπο RNTI και έπειτα τοποθετεί τα PDCCHs στους χώρους αναζήτησης common και UE-specific της περιοχής ελέγχου του resource grid χρησιμοποιώντας τη συνθήκη 3.46 για την αποστολή τους στην κατερχόμενη ζεύξη.

Όπως περιγράψαμε μέχρι τώρα κάθε PDCCH μεταφέρει ένα μήνυμα DCI με συγκεκριμένο DCI format και τύπο αναγνωριστικού RNTI το οποίο έχει κωδικοποιηθεί στο CRC του DCI. Ωστόσο η συσκευή δεν έχει καμία γνώση για τον αριθμό των CCEs της περιοχής ελέγχου, το aggregation level και το DCI format που έχει χρησιμοποιήσει ο σταθμός βάσης για την απεικόνιση του PDCCH στο resource grid. Σε κάθε υποπλαίσιο k όπου $k \in [0, 9]$ εκτελεί μία αλγοριθμική διαδικασία για τον εντοπισμό και την αποκωδικοποίηση της πληροφορίας DCI. Η διαδικασία αυτή είναι η αντίστροφη που εφάρμοσε ο σταθμός βάσης για την αποστολή του PDCCH.

Σε κάθε downlink υποπλαίσιο αρχικά αποκωδικοποιεί το PCFICH και το PHICH με σκοπό να ενημερωθεί για τον αριθμό των OFDM συμβόλων που καταλαμβάνει η περιοχή ελέγχου. Έπειτα από την τιμή του CFI υπολογίζει τον αριθμό των REs και των CCEs σύμφωνα με τους τύπους 3.43 και 3.44. Τα CCEs της περιοχής ελέγχου του υποπλαισίου k αριθμούνται από 0 έως $N_{CCE,k} - 1$.

Η συσκευή δεν έχει καμία πληροφόρηση για το πού μπορεί να έχει τοποθετηθεί το PDCCH και ποιες παράμετροι (aggregation level, DCI format) έχουν χρησιμοποιηθεί από το σταθμό βάσης για την κωδικοποίησή του. Εφόσον εντοπίσει τους common και UE-specific search spaces εκκινεί τη διαδικασία της τυφλής αποκωδικοποίησης

του περιεχόμενου των CCEs. Στην περίπτωση του blind decoding η συσκευή εντοπίζει τα υποψήφια PDCCHs (PDCCH candidates) σε κάθε περιοχή αναζήτησης και στη συνέχεια προσπαθεί να αποκωδικοποιήσει το καθένα από αυτά εφαρμόζοντας όλους τους πιθανούς συνδυασμούς RNTIs και DCI format. Για κάθε χώρο αναζήτησης (common και UE-specific) υποθέτει και ελέγχει όλα τα aggregation levels που υποστηρίζονται σύμφωνα με τον πίνακα 3.22.

Σε πρώτο στάδιο η συσκευή ξεκινάει με τον κοινό χώρο αναζήτησης. Αν το $N_{CCE,k}$ είναι μικρότερο του 16 τότε όλα τα CCEs βρίσκονται στο common search space. Ο αλγόριθμος εντοπισμού των υποψήφιων PDCCHs για την κοινή περιοχή αναζήτησης περιλαμβάνει τρία βήματα.

1. Εύρεση του αριθμού των υποψηφίων PDCCHs για καθορισμένο aggregation level όπως προκύπτει από τον πίνακα 3.22.
2. Εύρεση του δείκτη θέσης του αρχικού CCE όλων των υποψηφίων PDCCHs για το συγκεκριμένο aggregation level L σύμφωνα με τη συνθήκη:

$$(CCE_index) \bmod L = 0$$

3. Έλεγχος όλων των υποψηφίων PDCCHs που ξεκινούν από το δείκτη θέσης CCE_index του βήματος 2.

Όπως προκύπτει από τον πίνακα 3.22 ο common search space αποτελείται από 16 CCEs και υποστηρίζει aggregation level 4 και 8. Εφαρμόζοντας τον παραπάνω αλγόριθμο για $L = 4$ εντοπίζουμε τους κάτωθι τέσσερις PDCCH candidates.

PDCCH candidates $M^{(4)}$	CCE_index αρχικού CCE	Θέσεις διαδοχικών CCEs
PDCCH#0	0	0 - 3
PDCCH#1	4	4 - 7
PDCCH#2	8	8 - 11
PDCCH#4	12	12 - 15

Αντίστοιχα για $L = 8$ λαμβάνουμε τα παρακάτω αποτελέσματα.

PDCCH candidates $M^{(8)}$	CCE_index αρχικού CCE	Θέσεις διαδοχικών CCEs
PDCCH#0	0	0 - 7
PDCCH#1	8	8 - 15

Το πλήθος των τυφλών αποκωδικοποιήσεων της συσκευής για τον κοινό χώρο αναζήτησης υπολογίζεται ως εξής:

$$[M^{(4)} + M^{(8)}] * N_{DCI_format}^{common} \quad (3.47)$$

Όπου $N_{DCI_format}^{common}$: ο αριθμός των DCI format στο common search space

Ο κοινός χώρος αναζήτησης συνήθως υποστηρίζει μικρού μεγέθους DCI format όπως 1A, 1C, 3 και 3A. Αν υποθέσουμε ότι η συσκευή έχει ειδοποιηθεί από το RRC επίπεδο να ελέγξει για DCI format 1A και 1C τότε $N_{DCI_format}^{common} = 2$. Οπότε από την εξίσωση 3.47 προκύπτει ότι ο αριθμός των τυφλών αποκωδικοποιήσεων για τον κοινό χώρο αναζήτησης είναι **12**.

Για κάθε μία από τις 12 αποκωδικοποιήσεις η συσκευή ελέγχει το CRC σε συνδυασμό με όλους τους τύπους RTNI που υποστηρίζουν τα DCI format. Αν ο έλεγχος του CRC είναι επιτυχής τότε καταλήγει στο συμπέρασμα ότι το DCI μήνυμα στάλθηκε από το σταθμό βάσης χρησιμοποιώντας το συγκεκριμένο DCI format και RNTI. Στην περίπτωση που ο έλεγχος CRC αποτύχει η συσκευή προχωράει στον επόμενο συνδυασμό PDCCH candidate, DCI format και RNTI και επιχειρεί εκ νέου αποκωδικοποίηση.

Αφού ολοκληρωθεί ο έλεγχος στον κοινό χώρο η συσκευή συνεχίζει με τον ειδικό χώρο αναζήτησης. Με βάση τον πίνακα 3.22 η ειδική περιοχή υποστηρίζει aggregation levels 1, 2, 4 και 8. Επομένως η συσκευή επιχειρεί να ελέγξει όλους τους πιθανούς PDCCH υποψηφίους για κάθε aggregation level.

Η συσκευή για να υπολογίσει τις θέσεις των αρχικών CCEs και όλων των διαδοχικών CCEs ενός PDCCH υποψηφίου βασίζεται στο αναγνωριστικό RTNI, τον αριθμό του υποπλαισίου $k \in [0, 9]$, το πλήθος των CCEs $N_{CCE,k}$ και το aggregation level L . Το σύνολο των CCEs που εμπεριέχονται σε έναν PDCCH υποψήφιο του χώρου αναζήτησης $S_k^{(L)}$ προκύπτει από την παρακάτω σχέση:

$$L * \{(Y_k + m) \bmod [N_{CCE,k}/L]\} + i \quad (3.48)$$

Όπου :

$$L = \{1, 2, 4, 8\}$$

$$k \in [0, 9]$$

$$i \in [0, L - 1]$$

$$m \in [0, M^{(L)} - 1]$$

Για τον **κοινό χώρο** αναζήτησης $Y_k = 0$ για $L = 4$ και $L = 8$.

Για τον **ειδικό χώρο** αναζήτησης $S_k^{(L)}$ με aggregation level L η παράμετρος Y_k προκύπτει ως εξής:

$$Y_k = (A * Y_{k-1}) \bmod D \quad (3.49)$$

Όπου:

$$Y_{-1} = n_{RNTI} \neq 0$$

$$A = 39827$$

$$D = 65537$$

$$k = \lfloor n_s/2 \rfloor$$

n_s : ο δείκτης θέσης της χρονοθυρίδας μέσα στο LTE πλαίσιο

Στη συνέχεια εφαρμόζουμε τις σχέσεις 3.48 και 3.49 για τον υπολογισμό της θέσης του PDCCH#1 σε όλα τα υποπλαίσια του LTE πλαισίου για aggregation level υποθέτοντας σταθερό $N_{CCE,k} = 100$ και $n_{RNTI} = 100$. Τα αποτελέσματα συνοψίζονται στον πίνακα που ακολουθεί.

Aggregation level L	1
n_{RNTI}	100
$i \in [0, L - 1]$	0
$m \in [0, M^{(L)} - 1]$	1
A	39827
D	65537

Πίνακας 3.23: Δεδομένα υπολογισμού

Subframe k	Y_{k-1}	Y_k	$N_{CCE,k}$	CCE_index
0	100	50480	100	81
1	50480	53948	100	49
2	53948	21988	100	89
3	21988	10682	100	83
4	10682	31347	100	48
5	31347	42656	100	57
6	42656	10398	100	99
7	10398	58380	100	81
8	58380	44111	100	12
9	44111	23975	100	76

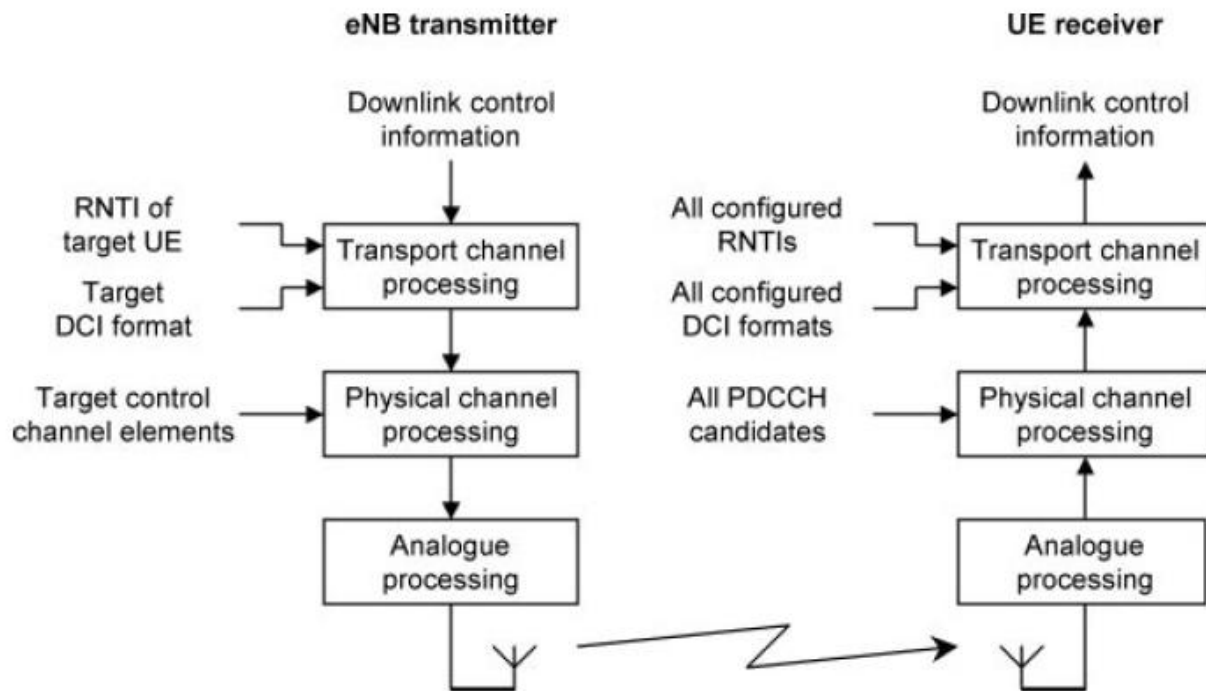
Πίνακας 3.24: Εύρεση του αρχικού CCE_index του PDCCH#1 σε όλα τα υποπλάισια του LTE πλαισίου.

Το σύνολο των τυφλών αποκωδικοποιήσεων για τον ειδικό χώρο αναζήτησης προκύπτει ως εξής:

$$[M^{(1)} + M^{(2)} + M^{(4)} + M^{(8)}] * N_{DCI_format}^{UE-specific} \quad (3.50)$$

Η UE-specific search space υποστηρίζει σχεδόν όλα τα DCI format όπως 0, 1A, 1, 1B, 1D, 2, 2A, 2B. Προκειμένου να διατηρείται το υπολογιστικό φορτίο της συσκευής σε αποδεκτά επίπεδα λόγω του αριθμού των αποκωδικοποιήσεων η συσκευή πάντα ελέγχει πρώτα τα DCI format 0 και 1A. Με αντικατάσταση των τιμών στην εξίσωση 3.50 προκύπτει ότι ο συνολικός αριθμός των τυφλών αποκωδικοποιήσεων για τον ειδικό χώρο αναζήτησης για τα DCI format 0 και 1A για όλα τα aggregation level {1, 2, 4, 8} είναι **32**.

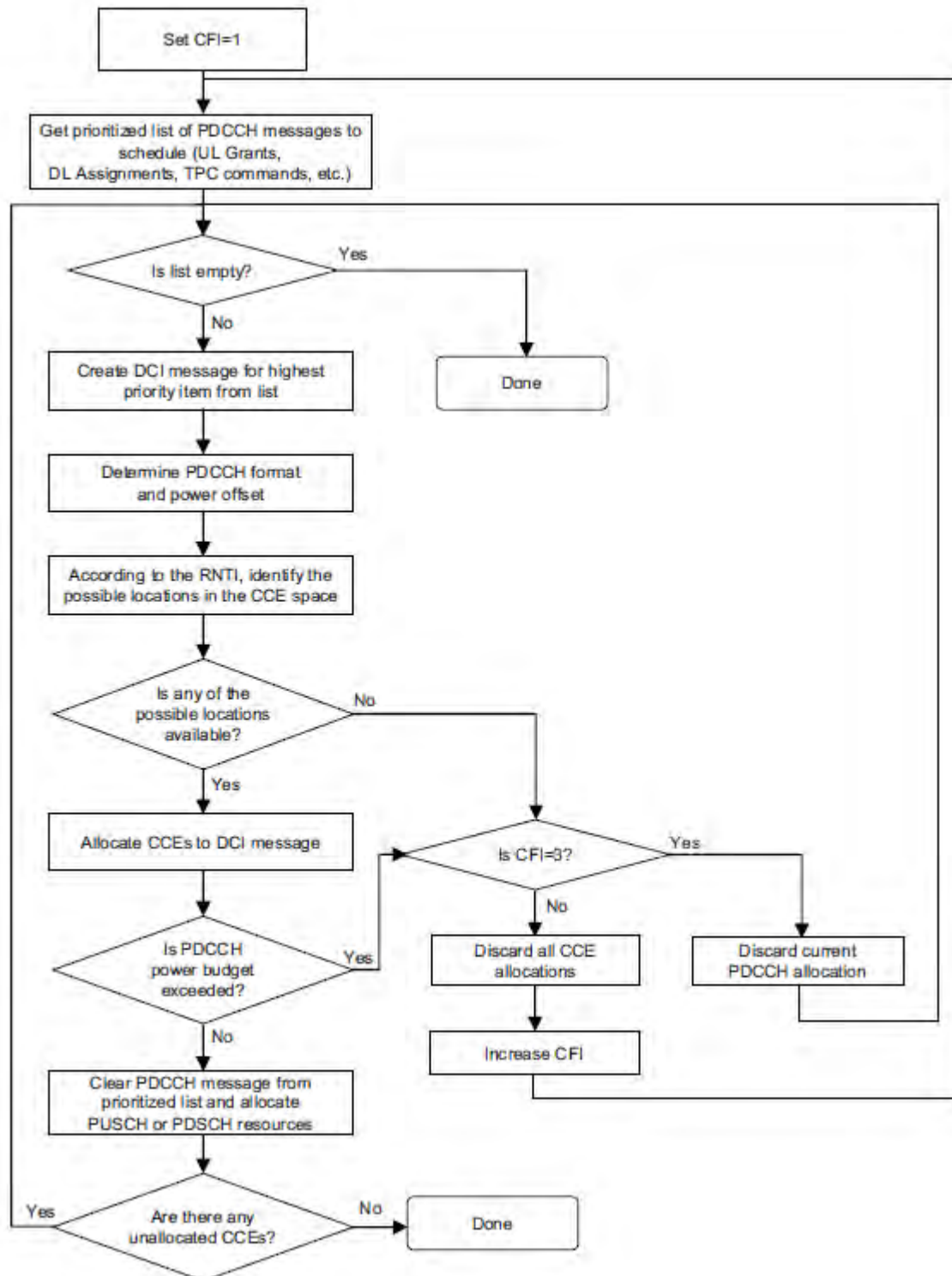
Συνολικά η συσκευή πραγματοποιεί **44** τυφλές αποκωδικοποιήσεις (12 στον κοινό και 32 στον ειδικό χώρο αναζήτησης) για κάθε υποπλάισιο από τα δέκα του LTE πλαισίου. Για κάθε μία από αυτές ελέγχει το CRC σε συνδυασμό με τα RNTIs και DCI format μέχρι να βρεθεί επιτυχής συνδυασμός. Το σχήμα 3.43 απεικονίζει τη διαδικασία αποστολής και λήψης του PDCCH.



Σχήμα 3.43: PDCCH transmission and reception

3.13.4.3.5 PDCCH scheduling process

Στην ενότητα αυτή παρουσιάζεται υπό μορφή διαγράμματος ροής ο αλγόριθμος που εκτελεί ο σταθμός βάσης για την απεικόνιση της πληροφορίας ελέγχου DCI στα CCEs της περιοχής ελέγχου κάθε υποπλαισίου.



Σχήμα 3.44: PDCCH scheduling process

3.13.5 PDSCH resource element mapping

Τα REs του resource grid αναπαριστούν έξι διαφορετικούς τύπους συμβόλων: user data, control region information, CSRs, PSS, SSS και PBCH data. Για δεδομένη διαμόρφωση φάσματος το μέγεθος του resource grid είναι σταθερό και ίσο με N_{total} .

$$N_{total} = N_{user_data} + N_{control_region_data} + N_{CSR} + N_{PSS} + N_{SSS} + N_{PBCH} \quad (3.51)$$

$$\text{Όπου } N_{control_region_data} = N_{PDCCH} + N_{PCFICH} + N_{PHICH}$$

Επειδή τα σήματα συγχρονισμού PSS και SSS τοποθετούνται μόνο στα υποπλάισια 0 και 5 και τα PBCH data μόνο στο υποπλάισιο 0 ο υπολογισμός των REs που αντιστοιχούν στα user data του PDSCH υποδιαιρείται σε τρεις κατηγορίες ανάλογα με το υποπλάισιο k.

1. Υποπλάισιο 0

Στο υποπλάισιο αυτό όλοι οι τύποι δεδομένων είναι παρόντες.

$$N_{user_data} = N_{total} - (N_{control_region_data} + N_{CSR} + N_{PSS} + N_{SSS} + N_{PBCH}) \quad (3.51)$$

2. Υποπλάισιο 5

Στο υποπλάισιο αυτό εκτός από τα user data εμπεριέχονται τα CSRs σύμβολα, τα $N_{control_region_data}$, N_{PSS} και τα N_{SSS} σύμβολα. Οπότε:

$$N_{user_data} = N_{total} - (N_{CSR} + N_{control_region_data} + N_{PSS} + N_{SSS}) \quad (3.52)$$

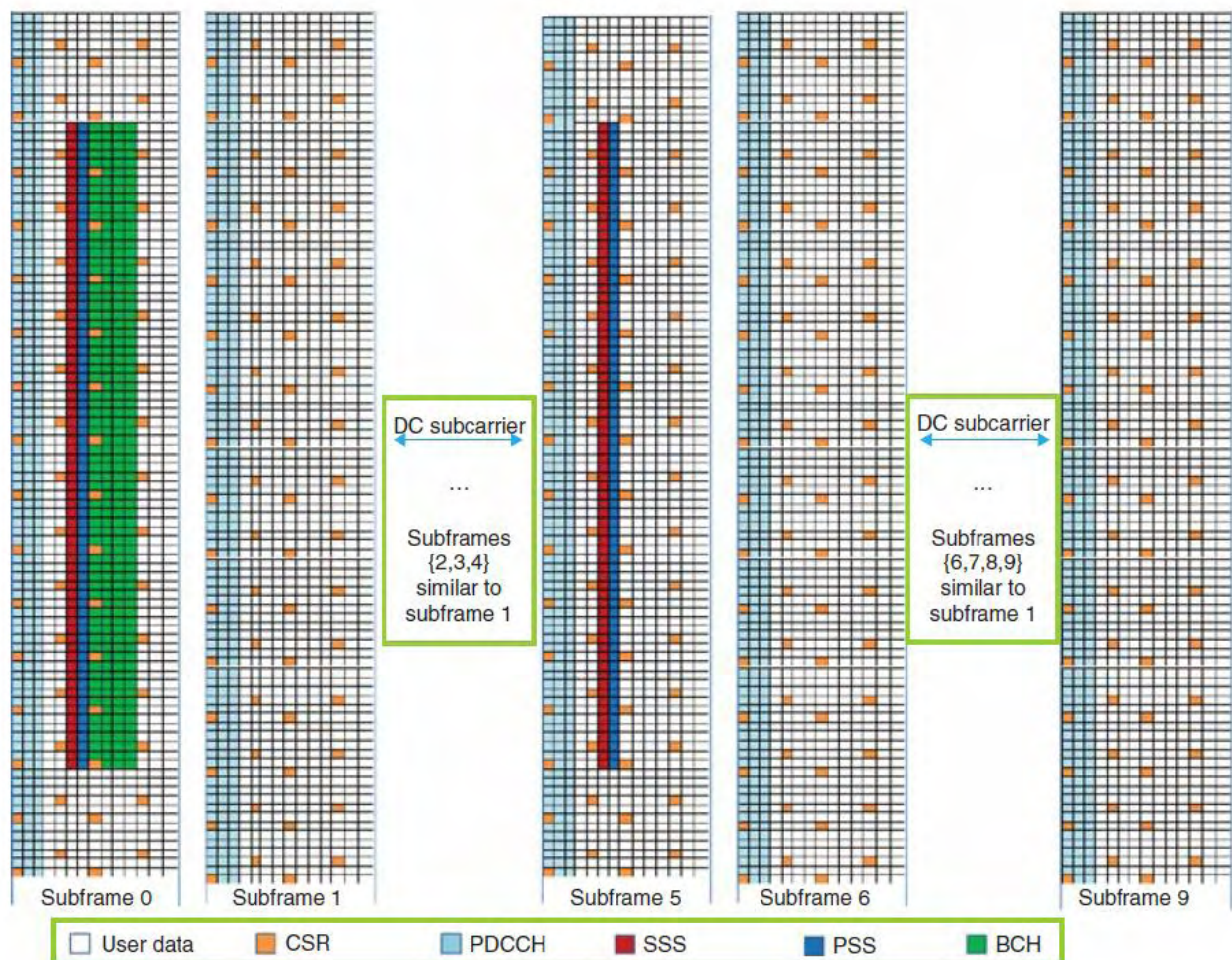
3. Υποπλάισια {1, 2, 3, 4, 6, 7, 8, 9}

Στα υποπλάισια αυτά εκτός από τα user data υφίστανται μόνο τα $N_{control_region_data}$ και N_{CSR} σύμβολα. Οπότε:

$$N_{user_data} = N_{total} - (N_{CSR} + N_{control_region_data}) \quad (3.53)$$

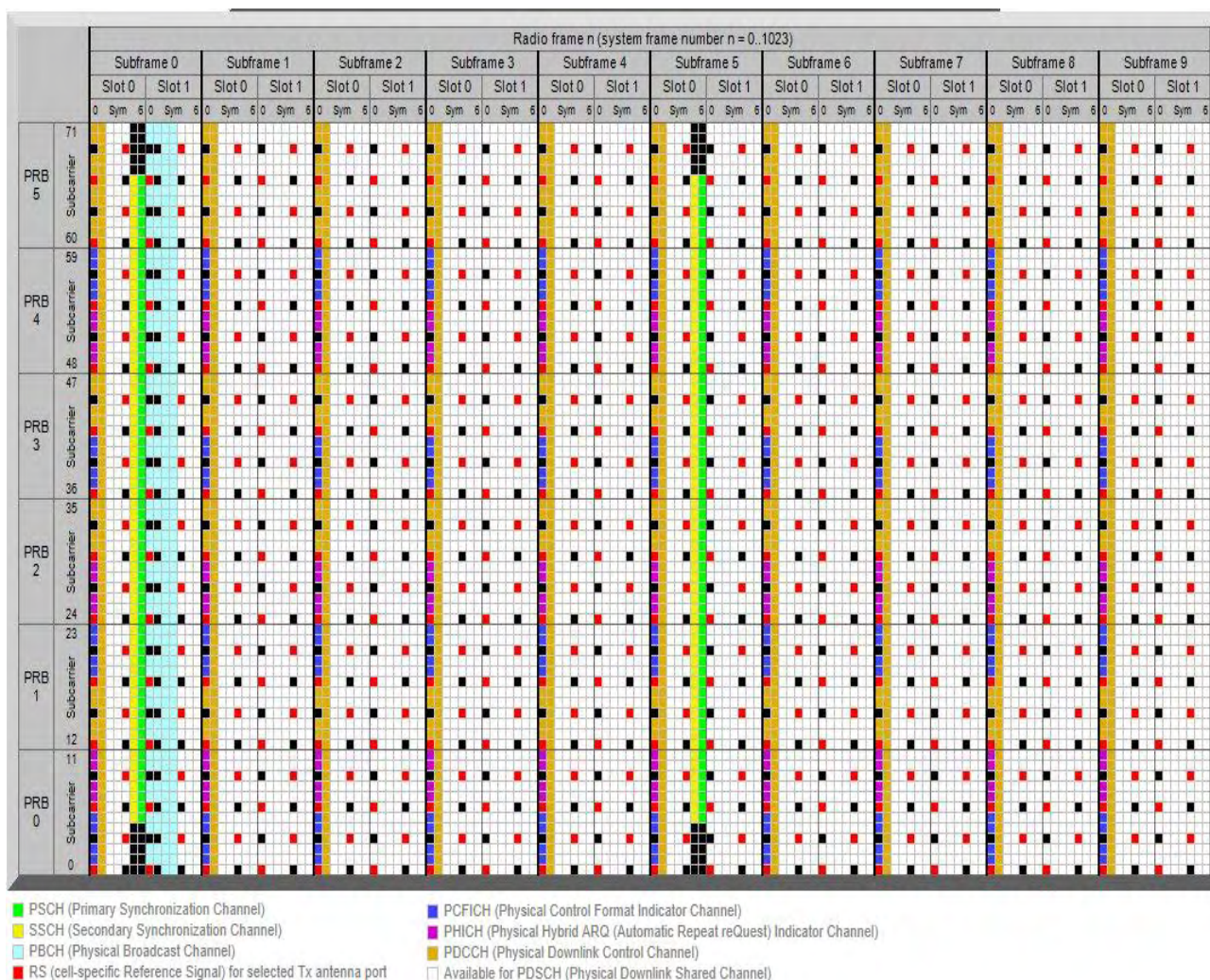
3.13.6 FDD downlink frame structure in LTE

Στην ενότητα αυτή παρουσιάζουμε την απεικόνιση όλων των διαφορετικών τύπων δεδομένων, user data, control region information, CSRs, PSS, SSS και PBCH data, στο resource grid κάθε υποπλαισίου καθώς και τη συνολική δομή του downlink FDD πλαισίου του LTE.



Σχήμα 3.45: LTE resource grid content

Στο σχήμα 3.46 απεικονίζεται η δομή του FDD πλαισίου της κατερχόμενης ζεύξης για διαμόρφωση φάσματος **1.4MHz** ($N_{RB}^{DL} = 6$), χρήση κανονικού κυκλικού προθέματος (**7 OFDM σύμβολα / slot**) και **περιοχή ελέγχου 2 OFDM συμβόλων** για τα PDCCH, PCFICH και PHICH.



Σχήμα 3.46: FDD downlink frame structure in LTE

3.14 Συμπεράσματα

Στο κεφάλαιο αυτό αναλύσαμε την αρχιτεκτονική του φυσικού επιπέδου στο LTE. Αρχικά αναφερθήκαμε στις τεχνολογίες OFDMA και SC-FDM που υποστηρίζει η διεπαφή αέρα στην κατερχόμενη και ανερχόμενη ζεύξη. Παρουσιάσαμε τις περιοχές συχνοτήτων λειτουργίας του LTE, τις τεχνικές duplexing FDD και TDD και τις διάφορες φασματικές διαμορφώσεις που επιτυγχάνονται χάρη στην τεχνολογία OFDM. Περιγράψαμε τα κανάλια επικοινωνίας μεταξύ των πρωτοκόλλων της αρχιτεκτονικής της διεπαφής του ασύρματου μέσου και τα στάδια του transport και physical channel processing για την μετάδοση των δεδομένων του PDSCH. Αναφερθήκαμε στην οργάνωση της πληροφορίας στο πεδίο του χρόνου και της συχνότητας και ορίσαμε τις έννοιες του resource grid, του resource block και του resource element. Τέλος προχωρήσαμε στη διαμόρφωση του resource grid της κατερχόμενης ζεύξης. Περιγράψαμε τα είδη των πληροφοριών που αναπαρίστανται σε αυτό, αναλύσαμε τη διαδικασία του resource element mapping και υλοποιήσαμε την δομή του FDD downlink πλαισίου του LTE.

Βιβλιογραφία

- [1] Houman Zarinkoub, “Understanding LTE with Matlab: From Mathematical Modeling to Simulation and Prototyping”, Εκδόσεις John Wiley & Sons, Ltd, 2014.
- [2] Christopher Cox, “An Introduction to LTE, LTE-Advanced, SAE and 4G Mobile Communications”, Εκδόσεις John Wiley & Sons, Ltd, 2012.
- [3] Stefania Sesia, Issam Toufik, Matthew Baker, “LTE - The UMTS Long Term Evolution: From Theory to Practice”, Εκδόσεις John Wiley & Sons, Ltd, 2011.
- [4] T. Ali – Yahiya, “Understanding LTE and its Performance”, Εκδόσεις Springer, 2011.
- [5] 3GPP TS 36.213, version 8.8.0, Release 8, “Evolved Universal Terrestrial Radio Access (E - UTRA), Physical layer procedures”, 2009 – 10.
- [6] 3GPP TS 36.211, version 8.7.0, Release 8, “Evolved Universal Terrestrial Radio Access (E - UTRA), Physical channels and modulation”, 2009 – 06.
- [7] 3GPP TS 36.212, version 8.8.0, Release 8, “Evolved Universal Terrestrial Radio Access (E - UTRA), Multiplexing and channel coding”, 2010 – 01.
- [8] 3GPP TS 36.401, version 9.0.0, Release 9, “Evolved Universal Terrestrial Radio Access (E - UTRA), Architecture description”, 2010 – 02.
- [9] 3GPP TS 36.201, version 8.1.0, Release 8, “Evolved Universal Terrestrial Radio Access (E - UTRA), Long Term Evolution (LTE) physical layer, General description”, 2008 – 11.
- [10] Ronit Nossenson, “Long Term Evolution Network Architecture”, in IEEE International Conference on Microwaves, Communications, Antennas and Electronics Systems, in Tel Aviv, Israel, 9 – 11 November 2009.
- [11] Freescale Semiconductor, Inc, “Long Term Evolution Protocol Overview”, 10/2008
- [12] Dino Flore, “LTE RAN architecture aspects”, in IMT – Advanced Evaluation, in Beijing, P.R. China, 17 – 18 December 2009.

- [13] Gwanmo Ku, “Resource Allocation in LTE”, Adaptive Signal Processing and Information Theory Research Group, November 11, 2011.
- [14] Χρήστος Ι. Μπούρας, “Κινητά Δίκτυα Επόμενης Γενιάς”, Πανεπιστημιακές Σημειώσεις, Πανεπιστήμιο Πατρών.
- [15] <https://el.wikipedia.org>
- [16] <http://www.sharetechnote.com/>
- [17] <http://nitintayal-lte-tutorials.blogspot.com/>
- [18] <http://lteuniversity.com/default.aspx>